

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb



Příprava a použití malt na bázi nízkoenergetických hydraulických pojiv

Preparation and use of mortars based on low-energy hydraulic binders

Student:

Bc. Vojtěch Odstrčil

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jana Daňková, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Odstrčil**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T021 Stavební hmoty a diagnostika staveb
Téma: **Příprava a použití malt na bázi nízkoeenergetických hydraulických pojiv**
Preparation and use of mortars based on low-energy hydraulic binders

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Pojivové systémy vyráběné pálením vhodných surovin při teplotách pod mez slnutí jsou v současné době předmětem mnoha výzkumných aktivit. Tato hydraulická pojiva mají nižší úroveň dopadů na životní prostředí, vyznačují se výbornými parametry fyzikálně – mechanických vlastností a dlouhou životností. Cílem práce je návrh složení, výroba a ověření vlastností malt na bázi různých druhů nízkoeenergetických hydraulických pojiv.

Doporučené členění diplomové práce:

1. Úvod do problematiky.
2. Teoretická část.
3. Experimentální část: laboratorní ověření vybraných vlastností čerstvé a ztvrdlé malty, analýza pojiv a dalších přísad a příměsí.
4. Hodnocení a závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

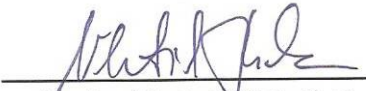
SCHULZE, W.; FISCHR, W.; TETEL, W.; LACH, V. Necementové malty a betony. Praha: SNTL, 1990.
HOŠEK, Jiří. Historické omítky. Grada Publishing as, 2007.
HUGHES, D. C., et al. Roman cements—Belite cements calcined at low temperature. Cement and Concrete Research, 2009, 39.2: 77-89.
a další normy, technická dokumentace výrobků a odborná literatura dle pokynů vedoucí DP.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Daňková, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2018

Datum odevzdání: 30.11.2018


doc. Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

20. 9. 2018

.....


podpis studenta

Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.9. 2018

Anotace

Diplomová práce se zabývá přípravou, použitím a vlastmi malt na bázi nízkoenergetických hydraulických pojiv. V teoretické části je uvedena charakterizace nízkoenergetických pojiv, jejich výroba a možnosti použití. Dále je popsán způsob návrhu hydraulického pojiva a postup prováděných zkoušek na odebraných vzorcích. Praktická část je zaměřena na aplikaci zkušebních metod zaměřených na ověření vlastností čerstvých a ztvrdlých malt připravených z různých druhů nízkoenergetických hydraulických pojiv. Testovaná pojiva jsou komerčními produkty, avšak pro srovnání bylo testováno i nově vyrobené nízkoteplotní hydraulické pojivo, které bylo vyrobeno z tuzemských surovin. Tyto použité suroviny jsou považovány v současnosti za odpad, který vzniká při těžbě vápence.

Klíčová slova

Nízkoenergetické, hydraulické pojivo, charakterizace, malta, vlastnosti.

Annotation

The diploma thesis deals with the preparation, use and property of mortars based on low-energy hydraulic binders. The theoretical part describes the characterization of low-energy binders, their production and their use. Further described is a method of designing a hydraulic binder and procedure of tests performed on samples taken. The practical part is focused on the application of test methods aimed at verifying the properties of fresh and hardened mortars prepared from different types of low-energy hydraulic binders. Tested binders are commercial products, but for comparison were tested a newly built low-temperature hydraulic binder, which has been produced from domestic raw materials. These used raw materials are currently considered to be waste resulting from limestone mining.

Keywords

Low-energy, hydraulic binder, characterization, mortar, properties.

Obsah

Úvod.....	9
Teoretická část.....	10
1. Charakteristika anorganických pojiv s nízkou teplotou výpalu	10
1.1. Historie hydraulických pojiv.....	11
1.2. Suroviny pro výpal.....	12
1.3. Složení surovinové směsi pro výrobu	13
1.4. Mechanismus výpalu	15
1.5. Zařízení pro výpal	16
2. Hydraulická vápna.....	21
3. Belitické cementy	23
4. Románský cement	25
5. Malty na bázi hydraulických pojiv	27
5.1. Plniva	27
5.2. Voda.....	28
5.3. Přísady a příměsi.....	28
6. Lom a vápenka Mokrá.....	29
Experimentální část.....	31
7. Hydraulické vápno značky Otterbein NHL 5 HYDRADUR	32
8. Románský cement značky PROMPT NATURAL CEMENT od firmy Vicat.....	32

9. Experimentální návrh hydraulického pojiva	32
9.1. Návrh nového pojiva.....	32
9.2. Termická analýza	34
9.3. Výpal.....	41
10. Příprava a zkoušení čerstvé malty	42
10.1. Stanovení konzistence pomocí střešacího stolu	43
10.2. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě.....	43
10.3. Stanovení objemové hmotnosti na čerstvé maltě	43
10.4. Stanovení počátku doby tuhnutí.....	44
10.5. Doba zpracovatelnosti malt – Metoda B	45
11. Zkoušky na ztvrdlé maltě	45
11.1. Objemová hmotnost suché ztvrdlé malty	46
11.2. Stanovení nasákavost	47
11.3. Pevnost v tahu za ohybu.....	48
11.4. Pevnost v tlaku	50
Závěr.....	52
Seznamy	54
Literatura	54
Technické normy.....	55
Internetové zdroje.....	56
Seznam použitého značení	57

Obrázky	59
Tabulky.....	60
Vzorce	61
Seznam příloh.....	62

Úvod

Jak již z názvu vyplývá, práce se zabývá použitím malt na bázi nízkenergetických hydraulických pojiv, jejich porovnáním z hlediska fyzikálních a mechanických vlastností.

Prvotním impulzem pro vybrání tohoto tématu byl celosvětový trend snižování emisí CO₂ a fakt, že fakultu oslovila firma Českomoravský cement závod Mokrý s přáním o využití jejich odpadní suroviny, která vzniká při odkrývání ložisek vápence. Proto je jedním z cílů vytvoření nového pojiva a jeho zařazení mezi normovaná pojiva. Navázaná spolupráce by mohla přinést potenciální výsledky i pro praktické využití.

Diplomová práce se dělí na dvě části. V teoretické části se zabývám charakterizací hydraulických pojiv, co spadá do kategorie nízkenergetického pojiva a popis základních zástupců. Nejběžnější typ hydraulického pojiva, který se v současné době používá, je portlandský cement. V posledních letech výrazně roste zájem o alternativní hydraulická pojiva typu hydraulických vápen a přírodního cementu. Bohaté uplatnění při opravách v památkové péči a zájem o nové druhy pojiv, využitelných v moderním stavitelství, které by představovaly alternativu k portlandskému cementu, jsou významnou motivací dalšího výzkumu v této oblasti.

V experimentální části práce se pokusím o vytvoření nového hydraulického pojiva z dodaných surovin. Dále se budu snažit vyrobit maltu z tohoto pojiva, kterou porovnáím se zakoupeným sortimentem. Zaměřím se na chemické a mechanické vlastnosti dle platných českých norem.

Závěrem práce by mělo být shrnutí výsledků zkoušek a diskuze nad výsledky.

Teoretická část

Termín pojiva označuje látky, potažmo směsi látek, které se vyznačují schopností samovolného zpevňování. Tímto se spolu spojují nejčastěji nesoudržná zrna nebo kusy látek v pevné soudržné systémy.

Správná funkce pojiv je zaručena několika předpoklady. Prvním z nich je počáteční tekutost (kapaliny, suspenze) pro správné rozmísení po površích a v pórech zrnité látky. Dále musí smáčet povrch pojeného materiálu a vytvářet tak adhezní spoje. Po vhodné době nabývá vlastností pevné látky (například: vypařením rozpouštědla, vysušením gelu, chemickou reakcí aj.). V poslední fázi by měla takto získaná pevná látka mít vyšší pevnost, což je důležitý předpoklad pro praktické využití pojiva ve stavební praxi [1].

Ve stavebnictví převažují pojiva na anorganické bázi. Jejich zpevňovací proces systému se tradičně rozděluje na dvě etapy: tuhnutí a tvrdnutí.

Tuhnutí je charakterizováno postupným ubýváním tekutosti či kašovitosti. Tato etapa postupně bez ostrého předělu předchází v tvrdnutí. Tvrdnutí je charakterizováno začínajícím převažováním vlastností pevných těles (pevnost, křehkost a pružnost).

U klasických stavebních pojiv je tuhnutí a tvrdnutí při běžné či mírně zvýšené teploty zpravidla spojeno s chemickou reakcí. Nová mechanicky pevná struktura je vyvíjena chemickými ději, které sami o sobě nevytváří zpevnění, pokud nejsou přítomny také děje fyzikální. Nejčastěji hovoříme o rekrystalizaci na jehlice nebo destičky, popřípadě o vzniku spojitě struktury koloidních gelů [2].

1. Charakteristika anorganických pojiv s nízkou teplotou výpalu

V dnešní době je stále naléhavější snaha o snižování emisí CO₂ a spotřeby energií při výrobě hydraulických pojiv. Tím se ve většině případů rozumí nižší v porovnání s klasickým portlandským cementem. Zařazení těchto nově vzniklých pojiv je ve většině případů obtížné a je nutné správně určit postup a způsob začlenění.

Pro praktické hledisko rozlišujeme dvě hlavní skupiny anorganických pojiv [2]:

1. Technická pojiva (např. fosfátová, tzv. vodní sklo aj.)
2. Stavební pojiva – maltoviny (např. cement, vápno, sádra)

Maltoviny se dají dále rozdělit:

1. Vzdušné
2. Hydraulické
3. Speciální

Vzdušné maltoviny po promíchání s vodou tuhnou a tvrdnou, vlivem různých chemických procesů (včetně hydratace), ale jejich produkty jsou stále pouze na vzduchu. Při použití ve vlhkém prostředí nebo ve vodě se jejich vlastnosti (hlavně pevnost) snižují a to často vede k rozpadu celého systému. Tyto maltoviny jsou určeny pouze pro použití na vzduchu, patří sem vzdušné vápno, sádrová pojiva a hořečnatá pojiva.

Hydraulické maltoviny jsou charakteristické tím, že po počátečním zatuhnutí na vzduchu dále tuhnou a tvrdnou jak na vzduchu, tak i pod vodou. Z toho vyplývá, že výsledné produkty hydratace jsou ve vodě nerozpustné, tím pádem odolávají trvalému působení vody. Zástupci této kategorie jsou hydraulické vápno a cementy.

Speciální maltoviny jsou maltoviny, které mají další specifické využití a vlastnosti. Může sem patřit např. odolnost vůči vysokým teplotám (hlinitanový cement) [2].

1.1. Historie hydraulických pojiv

Proces hydraulického tuhnutí a tvrdnutí byl znám již ve starověku, první údaje jsou dochovány z Řecka, Fénicie a Říma [8]. Staří Řekové míchali vápno s pískem z ostrova Santorini, takto vzniklá malta byla po zatvrdnutí stálá i pod vodou. Římané dávali do směsi s vápnem sopečný popel z oblasti Puzzuoli, a proto mají materiály podobného složení název “pucolán“. Marcus Vitruvius Pollio popisuje ve svém díle Deset knih o architektuře [10] přípravu římského cementu i práci s ním.

Ve středověku se recepty na hydraulická pojiva předávala jen v rámci uzavřených cechovních společenstev, která po sobě nezanechala záznamy. Velký rozmach nastal v novověku s příchodem průmyslové revoluce. Díky velkému rozvoji dopravy průmyslu a zejména staveb. V průběhu 19. století se hydraulická vápna dostávají do pozadí a postupně jsou vytlačena cementem.

1.2. Suroviny pro výpal

Přírodní ložiska vysokoprocentního vápence se vyskytují poměrně méně, než je tomu u vápenců s nejrůznějšími minerálními příměsemi.

Příměsi můžeme dělit podle doby vzniku [3]:

- na minerály primárního znečištění – došlo k němu v průběhu usazování, je homogenní, nebo na sekundární znečištění - vzniklé průsakem vod unášejících různé látky, které jsou ve vápencích nepravidelně rozděleny.
- na minerály sekundárního znečištění - je pro technologické využívání vápenců problematické, těžko se udržují konstantní vlastnosti vypáleného produktu.

Popsat vápence jediným kritériem není jednoduché, protože se vápence od sebe liší jak z hlediska chemického složení, tak fyzikálních vlastností. Hornina vápenec je tvořena hlavně nerostem kalcitem nebo aragonitem, vlastnosti těchto čistých minerálů jsou odlišné od vlastností vápenců, které tvoří a nedají se zaměňovat.

Z mineralogického hlediska dělíme vápence podle obsahu CaCO_3 :

- Vysoko procentní – nad 98 %
- Mírně znečištěné – 90- 98 %
- Středně znečištěné – 80-90 %
- Velmi znečištěné – pod 80 %

Pro výrobu přírodních hydraulických vápen se používají velmi znečištěné vápence (hlavně vápnité slíny) s obsahem CaCO_3 65-75 %.

Mezi hlavní minerální složky znečištěných vápenců patří oxid křemičitý (ve formě křemene) a sloučeniny železa a hliníku. Zvláštností je oxid hořečnatý (MgO), který se sice nezařazuje mezi nečistoty, ale obvykle CaCO_3 doprovází.

Podle obsahu MgCO_3 se dá vápenec rozdělit dle normy ČSN 72 1210 na [11]:

- Vápenec (do 10 % dolomitu)
- Dolomitický vápenec (10 – 50 % dolomitu)
- Vápnitý dolomit (50 – 90 % dolomitu)
- Dolomit (nad 90 % dolomitu)¹

Pro výrobu vápna je nejvhodnější vápenec, který má vhodné chemické složení, dobře se rozpojuje při těžbě (snadná těžba) a má schopnost dobře se vypalovat, bez rozpadání na aktivní nepřepálené vápno [3].

1.3. Složení surovinové směsi pro výrobu

Vhodná směs se navrhuje za použití tří základních modulů [6]:

- Hydraulický modul

Čím vyšší hodnota tím větší spotřeba energie pro výpal, ale cement vyšších pevností.

$$M_H = \frac{C}{S + A + F} \approx \text{pro cementy } 1,7 - 2,4 \quad /1/$$

¹ Přepokládá se, že druhá složka je kalcit.

- Silikátový modul

Čím vyšší hodnota tím vyšší chemická odolnost, ale hůře se melou a je dražší výpal.

$$M_S = \frac{S}{A + F} \approx \text{pro cementy } 1,7 - 2,7 \quad /2/$$

- Aluminátový modul

Čím vyšší hodnota tím vyšší počáteční pevnosti, ale nižší chemická odolnost.

$$M_A = \frac{A}{F} \approx \text{pro cementy } 1,5 - 2,5 \quad /3/$$

Další ukazatel vztahu mezi CaO a hydraulickými složkami je stupeň sycení vápnem S_s . Z poměrů základních slinkových minerálů se sestavují rovnice:

- Bogue $C = 2,8 \cdot S + 1,65 \cdot A + 0,35 \cdot F \quad /4/$

Postupným zkoušením byl vztah upraven:

- Köhl $C = 2,8 \cdot S + 1,1 \cdot A + 0,7 \cdot F \quad /5/$

V dnešní době se nejčastěji používá kompromis:

- Lea – Parker $C = 2,8 \cdot S + 1,18 \cdot A + 0,65 \cdot F \quad /6/$

Stupeň sycení vápnem se potom přepíše do vztahu:

$$S_{SK} = \frac{C}{2,8 \cdot S + 1,1 \cdot A + 0,7 \cdot F} \quad /7/$$

Běžné cementy mají hodnotu sycení vápnem $S_s = 85 - 95\%$.

1.4. Mechanismus výpalu

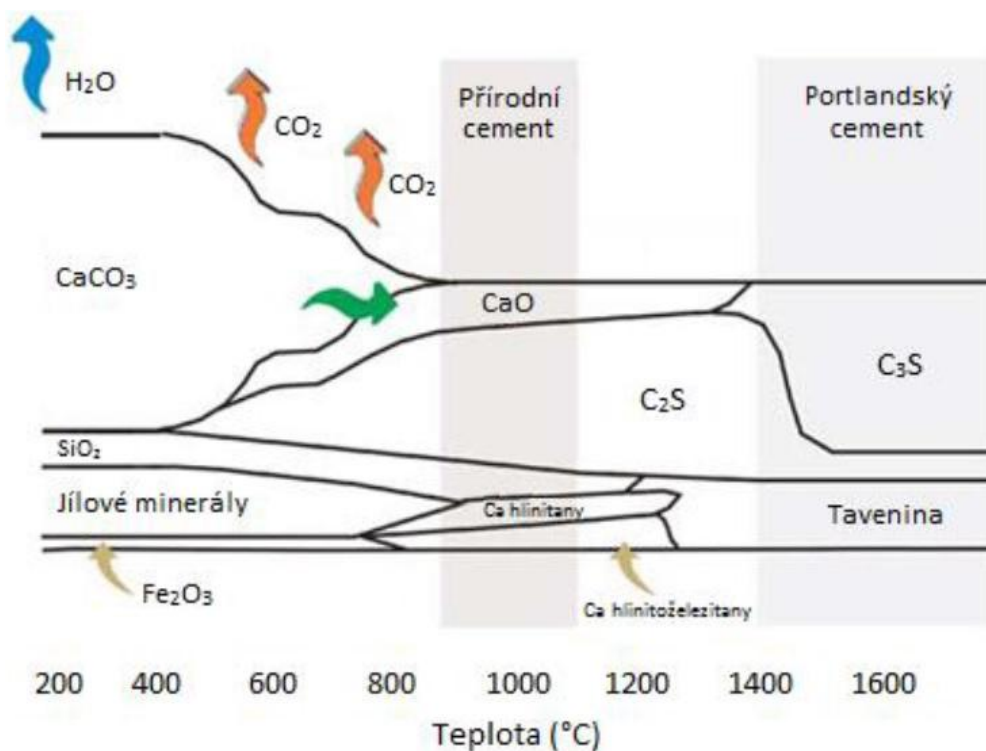
Vytěžený vápenec se drtí a třídí většinou přímo v lomu. Tento proces probíhá obvykle ve dvou fázích. V primárním stupni se používají čelistové drtiče v sekundární kladivové nebo odrazové. Mezi těmito fázemi drcení se kámen třídí roštovými nebo rotačními třídači. Třídění může probíhat i před vstupem do homogenizační síla a pak se pálí v kruhové, šachtové nebo rotační peci (viz kapitola Zařízení pro výpal). Nejrychleji se vypalují kulovité kusy a nejpomaleji deskovité tvary. Výroba je všeobecně hodně podobná jako u vápna vzdušného.

Tepelný rozklad vápence probíhá podle rovnice [Vzorec 8]:



Tento tepelný rozklad uhličitanu vápenatého probíhá za teploty, která závisí na parciálním tlaku CO_2 obklopujícího uhličitan vápenatý. Z termodynamického hlediska může dojít k rozkladu uhličitanu vápenatého již od 600 °C, při parciálním tlaku v normální atmosféře obklopující uhličitan vápenatý. Tento proces je však pomalý, a proto se pro praktické využití teplota zvyšuje na 1173 K nebo 900 °C. Čím je teplota vyšší, tím se doba rozkladu zkracuje. Během výpalu je nutné správné odstraňování vznikajícího oxidu uhličitého a to dostatečným odvodem kouřových plynů [3].

Při výpalu dochází k reakci mezi CaO a hydraulickými složkami a k vzniku podobných produktů jako ve slínku portlandského cementu, tedy $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (dikalciumsilikát), $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (trikalciumaluminát), $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (tetrakalciumaluminátferit) aj. Hlavní rozdíl oproti portlandskému cementu je v absenci $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (trikalciumsilikátu), který je pod 1250°C nestálý. Protože je teplota výpalu nižší než 1100°C [viz. Obrázek 1], zrna se vykazují velice slabým stupněm slinutí oproti portlandskému cementu [2].



Obrázek 1: Teplotní porovnání výpalu přírodního a Portlandského cementu [26]

Při výpalu vápence postupuje teplo od povrchu do vnitřní části kusu kamene a takto postupuje i jeho termický rozklad. Zavádí se termín zóna disociace, který označuje tento postupný přechod mezi vypáleným vápnem a nevypáleným vápencem. Čím jsme hlouběji ke středu kusu vápence, tím se zvyšuje odpor unikání CO_2 a mění se tepelná vodivost, která závisí na struktuře vápence a posléze i vápna. Tato vodivost je přibližně pět krát nižší než u původního vápence [3].

Pro názornou představu důležitosti dobrého odvodu spalin z pecního prostoru uvedme příklad: „Při výpalu 4 tun vápna za hodinu vznikne při teplotě 900°C zhruba $7200\text{ m}^3\text{ CO}_2$. K tomuto množství se přidá spálením 600 kg koksu, které je nutné k výpalu oněch 4 tun vápna, přibližně 22350 m^3 spalin při 900°C , takže pecním prostorem při této hrubé kalkulaci prochází hodinově 30 tisíc m^3 plynu“ [3].

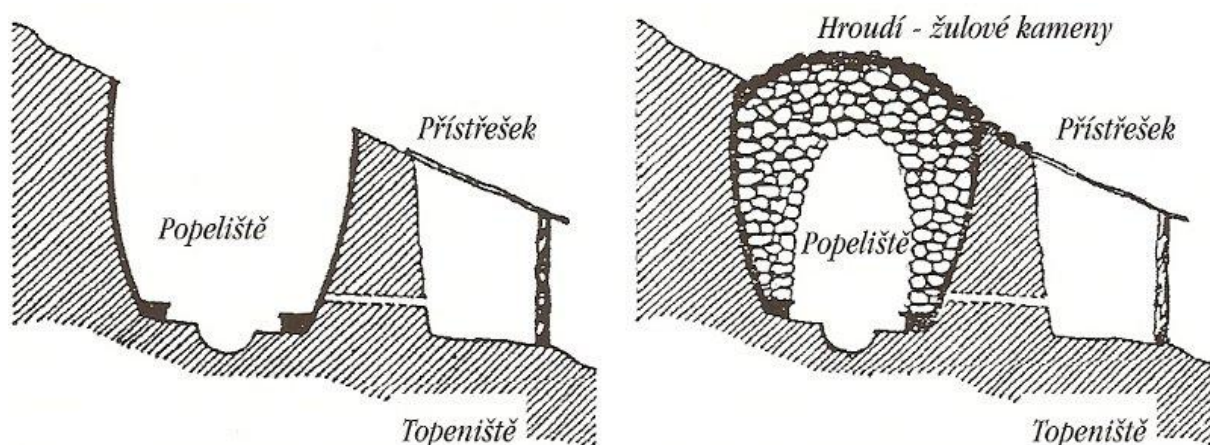
1.5. Zařízení pro výpal

Technologie výpalu hydraulických pojiv se vyvíjela dlouhá tisíciletí a s ní i zařízení k výpalu. Od nejjednodušších pícek a pecí, až po dnešní moderní zařízení.

Výpal v milířích (polní šachtové pece)

Jedná se o nejstarší a nejrozšířenější možnost jak vypálit vápno. Na území Slovenska a Maďarska se používaly milíře ještě po druhé světové válce.

Způsob zakládání a příprava suroviny pro výpal nebyl nikterak složitý. Práci zvládli nejméně dva spíše tři pracovníci, kdy jeden podává, a dva rovnají. Předtím, než se mohlo pálit, bylo nutno kámen nachystat. Říkalo se tomu, že se „tluče pec“. Z vytěženého vápenec se železnými palicemi udělaly větší i menší kusy, přičemž ideálním tvarem byly ploché desky, ze kterých se snadno stavěl milíř [Obrázek 2]. Pracovníci kamení kladli v podobě kopule. S postupným navyšování poskládaných kamenů se vnitřní prostor zmenšoval, až se vrchní část pece uzavřela klenbou, na kterou se dala nakonec vrstva žulových kamenů, tzv. hroudí.



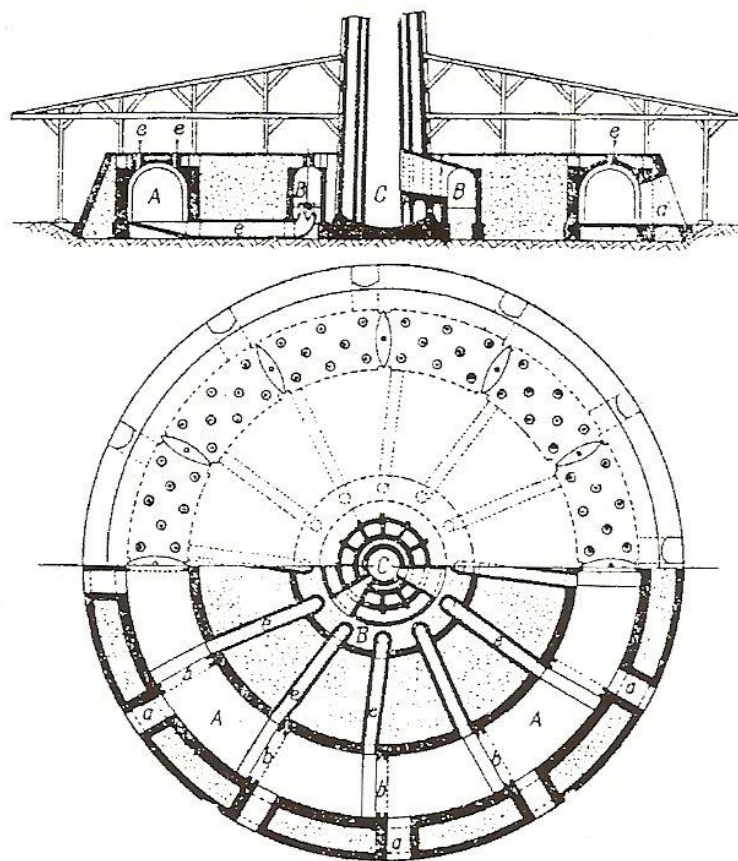
Obrázek 2: Výstavba milíře [7]

Délka výpalu závisela na teplotě okolního prostředí, tedy na ročním období a druhu použitého dřeva, podle toho se v peci topilo obvykle 12-16 hodin. Popel z pece byl opatrně vyhrabáván popelištěm. Žárem se vápenec rozžhavl do běla, otvory mezi ním však zůstávaly dlouho temně červené, až zrudověly a nakonec zbělely, což signalizovalo, že je vápno vypáleno. Pec se musela nechat vychladnout přibližně stejnou dobu, po jakou se v ní topilo. Pak bylo možné kameny opět rozebrat a vypálené vápno naložit na vůz [7].

Kruhové pece

Stavitel Bedřich Hoffmann je berlínský vynálezce této pece, který si přihlásil její patent roku 1858. První kruhová pec se na našem území stavěla roku 1868 v Přerově.

Princip kruhové pece je jednoduchý a osvědčený již z výpalu cihel [Obrázek 3]. Peciště je tvořeno souvislým kanálem, který umožňuje nepřetržitý postup ohně. Zdivo pece obsahuje navážecí a vyvážecí otvory, které pec rozdělují na určitý počet komor, přičemž každá má otvor pro odvádění spalin z pece. Palivo se přikládá otvory v klenbě s uzavíratelnými litinovými poklopy. Pod těmito poklopy se z vápence skládají topné šachtice, kde se přikládané palivo (uhelný mour) spaluje. S poslední pecí toho typu jsme se mohli v provozu setkat ještě v 60. letech 20. století [7] [21].



←
Obr. 1. Původní Hoffmannova kruhovka: *a* – dveře kruhového peciště, *A* – kruhové peciště, *b* – přepážky, *B* – sběrač kouře, *C* – komín, *e* – podzemní odtah do sběrače kouře, *f* – sypáky paliva.

Obrázek 3: Hoffmanova kruhovka [25]

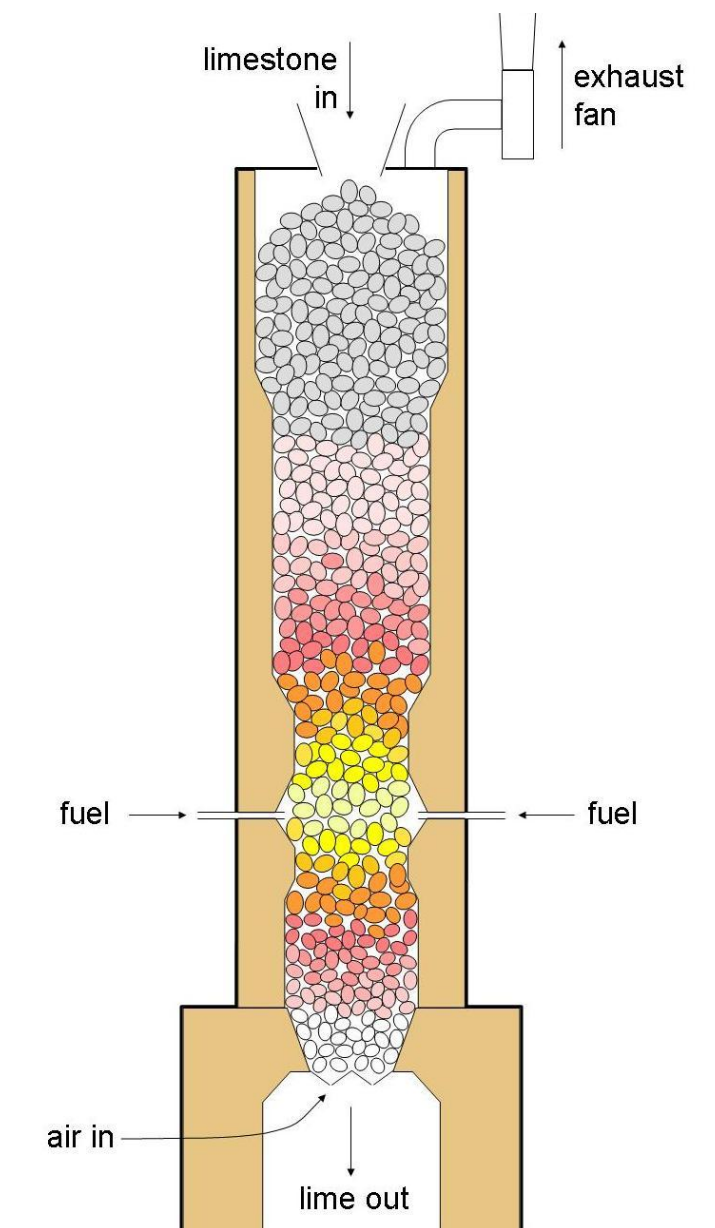
Šachtové pece

Rozeznáváme dva druhy šachtové pece, a to podle topení - vnější, tzv. hicovky, a vnitřní, kde palivo hoří přímo v šachtě.

V polovině minulého století se začaly na území Čech a Moravy stavět primitivní šachtové pece na vlastní tah (tzv. hicovky). Pec je asi ve třetině své výšky opatřena topeništěm s rošty na spalování dřeva či uhlí a obsahuje tři (i více) ohnišť. Potřebný spalovací vzduch se pecí nasává a prochází popelníkem topenišť k palivu na roštích. Horké spaliny a plameny z tohoto topeniště vstupují do pece a prostupují navezeným vápencem vzhůru. Vespod má pec vyhrabovací otvory, ve vrchní části je prodloužena v komín a opatřena zavážecím otvorem [7].

Druhý typ jsou šachtové pece s vnitřním topením. Palivo (koks) potřebné k výpalu vápna se spaluje přímo v peci, kde je společně s vápencem. Stejně jako pec s vnějším topením má i tato pec nahoře zavážecí a dole vyhrabovací otvor.

V praxi se můžeme setkat s šachtovou pecí s plynovým topením. Jsou to moderní vysoce automatizované pece, které pracují s umělým tahem a rovnoměrným prohoříváním [Obrázek 4]. Podobně jsou konstruovány šachtové pece s hořáky na mazut [5].



Obrázek 4: Řez šachtovou pecí [27]

Kruhovky a hicovky u nás zcela nahradily staré milíře ještě před první světovou válkou. Výroba vápna probíhala ve větších závodech, budovaných v oblastech s výskytem vápence, jako byl barrandien, severočeská křída, středočeské, šumavské a krkonošské krystalinikum, na Moravě severomoravský a jihomoravský kras, Pálava a oblast měst Hranice a Štramberk [7].

2. Hydraulická vápna

Hydraulické vápno se řadí mezi pojiva, která mají schopnost po zatuhnutí na vzduchu dále tvrdnout i pod vodou. Stavební hydraulické vápno se vyrábí pálením uhličitanu vápenatého, popř. vápenatohořečnatého, při nižších teplotách než u portlandského cementu (pod mez slinutí). Důležitým předpokladem pro vstupní suroviny je obsah dostatečného množství hydraulických součástí (oxidu křemičitého, hlinitého a železitého), aby dodaly vápnu hydraulické vlastnosti.

Hydratace probíhá podobně jako u portlandského cementu za vytvoření vodě odolných sloučenin. Kromě hydraulických složek je přítomna část oxidu nebo hydroxidu vápenatého ve formě volného vápna, která v maltách karbonátuje. Rozdílné teploty výpalu mají za následek velice proměnlivé vlastnosti výsledné suroviny a to hlavně při hydrataci. Nicméně kvůli vyšším pevnostem a odolnosti vůči působení agresivních látek, než je tomu u omítek a malt ze vzdušného vápna, se předpokládá delší životnost [24].

V normě ČSN EN 459-1 [12] se nachází obecné rozdělení všech vápen používaných ve většině evropských zemí. Hydraulická vápna zde mají své místo a dělí se na:

- **Přírozně hydraulická vápna** (natural hydraulic limes) značená jako **NHL**, vyráběná ze znečištěných (zahliněných) vápenců nebo z křemičitých vápenců.
- **Přírozně hydraulická vápna s příměsí dalších látek** (natural hydraulic limes with additional material) se značením **Z**, toto je skupina používaná pro speciální výrobky. Přidávají se vhodné pucolánové nebo další hydraulické složky max. do 20 % hmotnosti.
- **Hydraulická vápna** (hydraulic limes) s označením **HL**, jsou to směsné vápna sestavené z hydroxidu vápenatého, hlinitanů vápenatých, křemičitanů vápenatých a dalších vhodných látek.

Stavební hydraulická vápna jsou dále určována podle pevnosti v tlaku. Pro názornost uvedeme příklad zápisu značení: **EN 459-1 NHL 2-Z** vyjadřující přírozně hydraulické vápno s pevností v tlaku po 28 dnech (dle EN 459-2:2001) 2 MPa s příměsí pucolánu.

Na českém trhu je omezený výběr produktů, které se dají zařadit do skupin hydraulických vápen. Většina výrobců volí cestu směsných vápen. Tedy směsi vápna a portlandského cementu popřípadě dalších hydraulických příměsí. Takto získaný materiál má hydraulické vlastnosti podle množství přidaného cementu.

Jediným výrobcem prodávající hydraulické vápno u nás je Rakouská společnost Baumit s produktem Baumit Trasit plus - vysoce hydraulické trasové vápno. To se používá hlavně při sanačních pracích. Další dovoz je možný z Německa, Francie a Anglie, kde je používání hydraulických vápen běžnější. Uvedme několik zahraničních výrobků pro doplnění sortimentu [Tabulka 1]:

Název	Dodává se v pevnostech	Země původu
Otterbein CALCIDUR Natural Hydraulic Lime	2; 3,5; 5	Německo
SAINT-ASTIER PURE NHL	2; 3,5; 5	Dříve Francie dnes USA
Singleton Birch NHL	2; 3,5; 5	Spojené království
SECIL HL and NHL	2; 3,5; 5	Portugalsko

Tabulka 1: Sortiment hydraulických vápen

Hydraulická vápna se tradičně používají k přípravě omítkové a zdicí malty pro pozemní i vodní stavby, k přípravě šlechtěných omítek, na podkladní mazaniny a k výrobě některých druhů tvárnic.

Oproti vápnům vzdušným dochází k rychlejšímu tuhnutí a tvrdnutí, mají vyšší pevnost a větší odolnosti proti povětrnostním vlivům. Vápno slabě hydraulické by mělo zatvrdnout na vzduchu, potom může přijít do styku s vodou. Někdy se stane výhoda rychlého tuhnutí nevýhodou, pak je možné použít přídavek asi 5% sádrovce, který prodlouží tuhnutí až čtyřnásobně.

U přirozeně hydraulického vápna se cení, že se jedná o historické pojivo bez cementu a sádry. Je velmi pevný v porovnání s vápnem vzdušným. Při použití tohoto vápna nehrozí zanesení soli do zdiva, pojivo je dobře přilnavé ke kameni a nezadržuje vodu ve zdech. Ve srovnání s portlandským cementem se pálí při nižší teplotě, vzniká tak méně emisí a je menší spotřeba tepla [24].

3. Belitické cementy

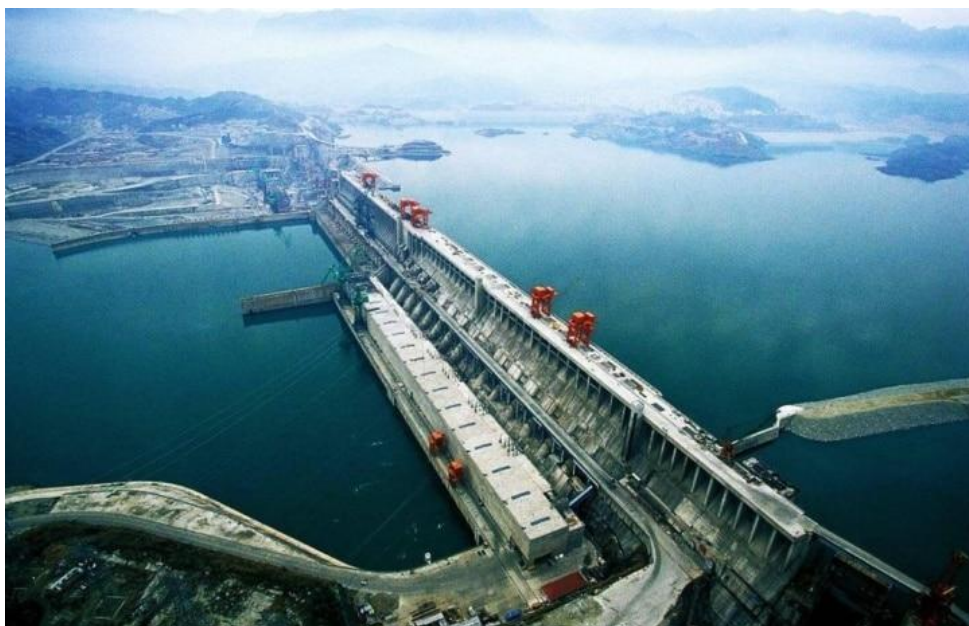
„Nízkoenergetické cementy“ takové označení se používá pro cementy s nižší energetickou spotřebou pro výpal, které mohou sloužit jako částečná náhrada portlandského cementu. Tohoto kritéria lze docílit u cementů vyrobených na bázi slínkového minerálu belitu C_2S . Belitické cementy byly a jsou velice vhodné pro použití ve stavebnictví. Velké uplatnění nalézají při stavbách masivních konstrukcí.

Zájem o belitické cementy se týká zejména cementů s nízkým obsahem CaO a tím i nízkých emisí CO_2 při výrobě. Belit, jeden ze základních slínkových minerálů, di-kalcium silikát (C_2S), má důležité výhody v porovnání s alitem (C_3S), jako jsou: lepší odolnost vůči síranům a kyselinám, což je přisuzováno nižšímu obsahu vznikajícího portlanditu při hydrataci, a snížení hydratačního tepla, čímž se potlačí problémy se smršťováním. Další charakteristickou vlastností belitického cementu je nízká reaktivnost a s tím spojené nízké počáteční pevnosti.

Zvýšení reaktivnosti a počátečních pevností se dá ovlivnit vhodným návrhem a zpracování slínku. Například přidání alkalických kovů, oxidů železa nebo oxidů hliníku do struktury C_2S , a velice rychlého chlazení slínku při výpalu se současným velmi jemným pomletím můžeme získat více reaktivní belitický cement. Ale tyto metody mají svá rizika. Přidáním alkálií se může zvýšit riziko alkalicko-křemičité reakce. Při jemnějším mletí se může zvýšit spotřeba vody [22].

V současné době se čistě belitické cementy v České republice neprodávají ani nevyrábí. Nicméně takto vyrobený belitický cement by se nejspíše dal zařadit do kategorie Speciálních cementů - Cement s nízkým hydratačním teplem dle ČSN EN 197-1 [13].

Belitický cement se uplatňuje ve velké míře pro stavbu masivních betonových konstrukcí ve vodním hospodářství. Dobrým příkladem je stavba největší přehrady světa, Tři soutěsky [Obrázek 5].



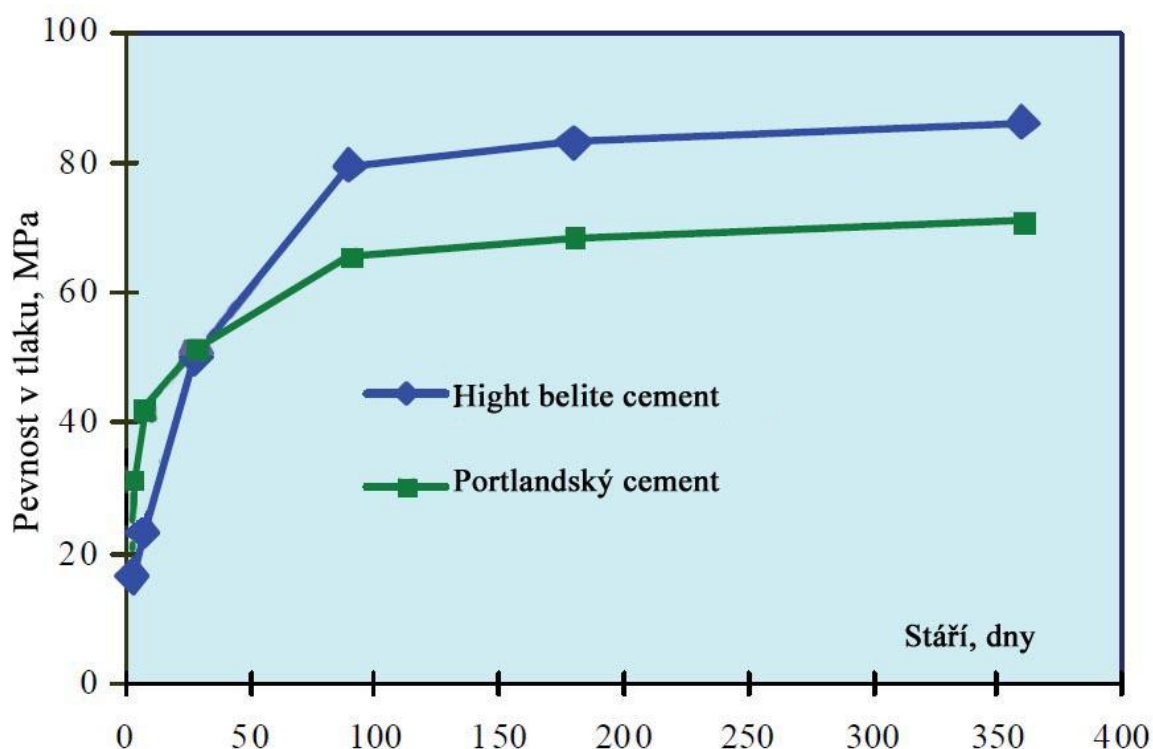
Obrázek 5: Tři soutěsky – hráz [29]

Stavba započala 14. prosince 1994 a na masivní hráz, o rozměrech výšky 185 m a délky 2335 m, bylo zapotřebí 27,15 milionu krychlových metrů betonu [29]. Zde byl použit HBC (Hight belite cement), který se v Číně vyvíjel od roku 1996. Při porovnání složení s portlandským cementem je jasně vidět záměna v množství hlavních minerálů [Tabulka 2].

Pojivo	Hlavní minerály	
	C3S	C2S
HBC (Hight belite cement)	24,69	52,96
PC (portlandský cement)	52,36	24,49

Tabulka 2: Porovnání hlavních slínekových minerálů

Beton připravený z HBC nejen, že se dá považovat za nízko energetický, ale i celkové emise při výrobě (SO_2 , NO_x , a CO_2 , atd.) jsou sníženy v porovnání s klasickým portlandským cementem. Dále se jedná v mnoha ohledech o daleko vhodnější pojivo než klasický PC a to hlavně díky nižším hydratačním teplotám, vyšším konečným pevnostem [Obrázek 6] a větší toleranci k vyšším teplotám při zpracování. Nevýhodou je, že má pomalý nástup pevností. Tento fakt může výrazně omezit rychlost výstavby, a proto se dá použít jen na určité typy konstrukcí [23].



Obrázek 6: Graf ukázka pevnosti v tlaku s porovnáním HBC s Portlandským cementem [23]

4. Románský cement

Dalším zajímavým hydraulickým pojivem je románský cement. Jedná se o znovu objevené historické pojivo, které se pro řadu odborníků (restaurátorů, historiků i umělců) stalo předmětem zájmu. Výroba tohoto materiálu je ekonomická a má příznivé environmentální charakteristiky. Vývojově ho překonal portlandský cement, přesto má neocenitelné vlastnosti, jako je malá smrštitelnost, dobrá trvanlivost, nižší teploty výpalu s čímž souvisí menší spotřeba energie při výrobě a další [5].

Románské cementy patří do skupiny přírodních hydraulických pojiv vyrábějících se od 19. století. Navzdory označení románský (římský) jsou vlastnosti tohoto pojiva jiné než u původního, používaného v antickém Římě, ale ve své době ho hodně připomínal. Dodnes se jeho výroba zdokonaluje, ale název zůstává. Patentovat si ho nechal již v roce 1796 James Parker (proto je známý též jako Parkerův cement) a protože se vyráběl pálením vápence obsahujícího jíly z ostrova Sheppey v Anglii, získal přívlastek přírodní.

Velmi rychle si ho oblíbili v Evropě později také v USA. Největšího rozmachu dosahovalo jeho využití ve Francii, kde se ho ještě na začátku 20. století vyrábělo dvakrát více než jinde ve světě [33].

Hlavní výhody toho hydraulického pojiva jsou v přirozeném složení, které lze člověkem jen těžko napodobit a dále to byla výhodná krátká doba tuhnutí, bez potřeby hašení (asi 10 až 20 minut), vysoká odolnost a trvanlivost, umožňující montáž prvků na fasády a jeho barva, dokonale imitující vzhled kamene [4].

Výroba románského cementu na našem území začíná až v 70. letech 19. století. Na území Rakouska - Uherska však vznikaly první cementárny již ve 40. letech. První byla otevřena v roce 1842 v Tyrolsku. Románský cement byl nejoblíbenější a nejpoužívanější stavební materiál, o čemž svědčí několik desítek fungujících cementáren (včetně našeho území). První cementárna u nás byla založena v Praze v roce 1871. Stavební rozvoj a budování městských center vyžadoval styl bohatý na dekorativní prvky. Tento materiál tak doplňoval trojici – kamení, vápno a sádra a splňoval základní požadavek rychlé a levné zdobnosti. V Polsku, od Krakova na jih až k Jaderskému moři se dokonale zachovala celá řada objektů vybudovaných v technologii románského cementu [5].

Počátkem 20. století je románský cement vytlačován méně technologicky náročným portlandským cementem a také nástupem funkcionalistického stylu v architektuře, který upřednostňuje tvarovou jednoduchost. Poslední továrna na výrobu románského cementu na našem území se uzavírá v roce 1945 v Tlumačově.



Obrázek 7: Štuková výzdoba z románského cementu [28]

Unikátní vlastnosti románských cementů byly zkoumány teprve nedávno v rámci projektů ROCEM a ROCARE financovaných z fondů EU. Dnes je tento materiál využíván restaurátory na obnovu architektury z 19. a 20. století, nejvíce pro štukovou výzdobu a fasádní omítku [Obrázek 7].

5. Malty na bázi hydraulických pojiv

Malty z hydraulických pojiv lze charakterizovat různými vlastnostmi, které se odvíjejí od druhu pojiva, druhu a struktury plniva a nedílnou součástí tohoto celku je i voda. Další možností úpravy vlastností se dá docílit přidáním přísad a příměsí.

5.1. Plniva

Plnivo je jednou z důležitých složek malt pro zdění a omítání. Podobně jako u betonu se používá přírodní kamenivo těžené nebo drcené, hutné nebo pórovité kamenivo z průmyslových odpadů, jako jsou granulované strusky, popílky, škváry. Dále přírodní a umělé pórovité kamenivo záměrně vyráběné z přírodních surovin, například křemelina, perlit, keramzit, expandit, cihelná nebo šamotová drť apod. Do poslední skupiny zahrnujeme organická (celulosa, polyamidová, zvířecí chlupy apod.) a anorganická vlákna (skleněná, strusková, keramická, azbest) [9].

Nejdůležitější z nich jsou písky, používané při výrobě běžných malt. Měly by obsahovat velmi malé podíly jemných jílových částic, protože může dojít v důsledku neobalení jejich zrn pojivem ke snižování pevností omítek. Již Vitruvius ve svém díle [10] upřednostňoval písek ostrý nebo směs ostrého a kopaného v poměru 1 : 1. Ostrý písek, s plynulou křivkou zrnitosti, zajišťuje vyšší pevnost omítek, menší smrštění a delší životnost. Další nevýhodou jemných částic je, že vyžadují větší množství záměsové vody [24].

Velikost a tvar zrn závisí na použitém druhu malty. Kamenivo má mít co nejhustší skladbu a malou mezerovitost. Zrnitost je kontrolována síťovým rozborem. Pro ušlechtilé omítky je nutná zvláštní skladba zrn a často kamenivo různých barev.

Součástí kameniva mohou být cizo-zrnné příměsi, které občas nepříznivě ovlivňují vlastnosti namíchané malty. U písků jsou to nejčastěji jílové nebo slínové součásti. Ty mohou na povrchu zrn zanechat tenkou vrstvu, která zabraňuje soudržnosti mezi pojivem a zrnem a podle podílu vlhkosti mají tyto součásti sklon k bobtnání nebo ke smršťování. Proto by nemělo být množství odplavitelných látek vyšší než 15 %. Jíl nebo úlomky uhlí se mohou spojovat v hrudky, které svým bobtnáním způsobují porušení omítky. Nevhodné jsou i humusové nebo jiné organické látky, přítomnost opálu (velmi reaktivní forma SiO_2), které v přítomnosti alkálií způsobuje rozpínání a tvorbu trhlin [9].

5.2. Voda

Voda musí být v maltové směsi v potřebném množství, směs tím získá dobrou konzistenci a zpracovatelnost. Nejčastěji se používá čistá přírodní voda. V případě nejasnosti ve složení vody, lze provést chemický rozbor a podle toho použít či nikoliv. Potřebné množství vody má být co nejmenší, protože část vody, která se nezúčastní chemické reakce, je přebytná. Je nutná pouze k získání požadované konzistence malty [24].

5.3. Přísady a příměsi

Přísady a příměsi zlepšují některé vlastnosti malt, nejen v průběhu zpracování a přípravy, ale i přispívají ke konečným vlastnostem zatvrdlé malty. Mají povahu anorganickou nebo organickou jsou kapalné, pastovité nebo práškové.

Použití přísad a příměsí sebou nese i jistá pravidla. Je dobré používat takové přísady a příměsi, jejichž účinek je prokazatelně doložen. Zlepšení jedné nebo více vlastností, může vést na druhé straně ke zhoršení vlastností jiných. Příznivější laboratorní výsledky se v praxi ukazují jako nepřesné, zpravidla příznivější, protože příprava směsi v praxi není tak dokonalá. Je zapotřebí přesné dodržování množství vybrané přísady nebo příměsí a neodchylovat se od technologického předpisu. Užitím více přísad nebo příměsí nemusí vést ke zlepšení vlastností, ale je možná nepříznivá chemická reakce. U suchých prefabrikovaných směsí nelze použít žádné dodatečné přísady ani příměsi bez předchozích zkoušek [24].

6. Lom a vápenka Mokrá

Pro dílčí část experimentální části diplomové práce byla použita cementářská surovina z lomu Mokrá. V této kapitole je uvedena charakteristika území a stručná historie lomů Mokrá.

Vápenka Mokrá u Brna se nachází v Jihomoravském kraji a zahrnuje celkem tři velkolomy [Obrázek 8]. Lokalita dobývacího prostoru se nachází na styku karbonátové a flyšové sedimentace moravskoslezského paleozoika. Vznikla během variské orogeneze a v pozdějších fázích deformace. Sedimentární a tektonická činnost zde zanechala horniny, jako jsou vápenec, břidlice, droba, slepenec, písek a tím vytvořila ideální podmínky, aby se o místo začalo zajímat. Slepence jsou zrnitostně špatně vytríděné, objevují se drobné valouny až balvany. Největší bloky jsou tvořeny špatně až středně zaoblenými vápenci. Kromě vápencových valounů se objevuje poměrně pestrá směs metamorfitů, granitoidů, vulkanitů, jílu aj. [30].



Obrázek 8: Mapa lokality Mokrá ID: 3280 [30]

Historie lomu sahá do šedesátých let minulého století, kdy v roce 1957 vznikly první studie výstavby. Rozhodnutím Ústředního báňského úřadu v Praze z roku 1961 byl vyhlášen dobývací prostor Mokrá, jeho plošný rozsah byl určen na 265,98 ha.

První rotační pec na výpal slínku byla symbolicky zapálena 31. října 1968. Rotační pece na výpal vápna a jednotlivé mlýny na mletí cementu byly dány postupně do provozu ve druhém pololetí roku 1969 [31].

Po provedené privatizaci v roce 1992 se investiční činnost zaměřila na modernizaci technologických zařízení (např. mobilní vrtací soupravy), zvyšování kvality výrobků a zejména na ochranu a tvorbu životního a pracovního prostředí (hadicové filtry, čistírna povrchových vod, snižování emisí, hospodaření s odpady), revitalizaci vytěžených prostorů a v neposlední řadě o zlepšování pracovních podmínek zaměstnanců (podpora dalšího vzdělávání a osobního růstu).

V roce 2003 byla výroba vápna, včetně všech s ní souvisejících činností, prodána společnosti Carmeuse Czech Republic, s.r.o. (Společnost Carmeuse byla založena v roce 1860 v městě Liege a dnes je předním producentem vápna s asi 80 výrobními provozy na celém světě) a poté zahájena další rekultivace lomů s cílem podpořit přirozený vývoj přírodního prostředí ve vápencových oblastech, dále byla instalována nová odprašovací zařízení v lomu, na dopravních cestách suroviny a na výpalu slínku. V roce 2004 byl pořízen kyvadlový mlýn [31].

Výrobní program vápenky se orientuje na produkci upravených a mletých vápenců, vápna kusového, mletého a hydratovaného a směsi na bázi vápna. Uplatnění nacházejí v metalurgii, stavebnictví a při výrobě stavebních hmot, v průmyslu chemickém a farmaceutickém a při výrobě skla. Dále se používají pro zemědělství, potravinářství a zdravotnictví, v průmyslu keramickém i petrochemickém. Narůstající podíl vápenců a vápen se orientuje na ochranu životního prostředí a do péče o krajinu. Jedná se o čištění odpadních vod, úpravu kalů a odpadů, úpravu pitné a průmyslové vody, k odsiřování a čištění spalín, neutralizaci a vápnění lesních a polních půd. V neposlední řadě je mletý vápenec a vápno důležitý k odsiřování spalín v tepelných elektrárnách [32].

Experimentální část

Cílem experimentální části práce bylo porovnat vlastnosti nízkoeenergetických hydraulických pojiv. Téma diplomové práce oslovilo vývojové pracovníky společnosti Českomoravský cement, závod Mokrý. V rámci spolupráce mezi Katedrou stavebních hmot a diagnostiky VŠB TUO FAST a výše zmíněnou společností byly testovány dva typy surovin z lomu Mokrý jako potenciálně vhodné pro výrobu nízkoteplotního hydraulického pojiva. Jednou ze dvou testovaných surovin byl odpad z těžby, tzv. skrývka. Suroviny byly podrobeny analýze složení. Poté následovala etapa experimentálního výpalu a nakonec výroba malty z připraveného experimentálně vyrobeného hydraulického pojiva. Čerstvá a ztuhlá malta byla testována převážně podle norem ČSN EN 1015 Zkušební metody malt pro zdívo a normy ČSN EN 12808-5 Lepidla a spárovací malty pro keramické obkladové prvky na tyto vlastnosti:

- Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)
- Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě
- Stanovení doby zpracovatelnosti a času pro úpravu čerstvé malty
- Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty
- Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku
- Stanovení nasákavosti

Jako srovnávací komerční pojiva byli vybráni dva zástupci: přirozeně hydraulické vápno Otterbein NHL 5 HYDRADUR (dále jen NHL 5) a PROMPT NATURAL CEMENT od firmy Vicat (dále jen VICAT). NHL 5 má nižší pevnosti a odlišné jsou další vlastnosti než u VICAT, a proto byli vybráni tito dva zástupci, aby se nově vzniklé pojivo dalo dobře zařadit.

7. Hydraulické vápno značky Otterbein NHL 5 HYDRADUR

Toto německé hydraulické pojivo na bázi přírodního hydraulického vápna splňuje veškeré požadavky stanovené normou ČSN EN 459-1[12]. Pro výrobu se používá mušlový vápenec, který se pálí a hasí. Výsledné pojivo neobsahuje cement a sádro, tvrdne bez pnutí a je velmi pevný po vytvrdnutí. Při použití tohoto vápna nehrozí zanesení soli do zdiva, pojivo je dobře přilnavé ke kameni, vysoce pružné a nezadržuje vodu ve zdech. Používá se k přípravě zdící a omítkové malty speciálně pro ekologické, biologické domy a výstavby bytů, pro sanaci a památkovou péči (více viz technický list [Příloha č. 1]).

8. Románský cement značky PROMPT NATURAL CEMENT od firmy Vicat

Prompt přírodní cement z Francie od firmy Vicat je skutečný románský cement. Vyrábí se pouze z jediné základní suroviny ve formě jílového vápence. Výpal se provádí v peci při teplotě nižší než je teplota slnutí a poté se pomalu ochlazuje. Výhody výsledného produktu jsou snadné mletí, dobré hydraulické vlastnosti a rychlé tuhnutí a tvrdnutí (více viz technický list [Příloha č. 2]).

9. Experimentální návrh hydraulického pojiva

9.1. Návrh nového pojiva

Z lokality Mokrá nám bylo zasláno množství jemně mleté surovinové moučky (H010 surovina Mokrá dále jen SM), kterou dávkuje do rotační pece a dále, kusová skrývková břídlíce (dále jako RB), určená jako redukční surovina. Chemické složení určené výrobcem je uvedeno v [Tabulka 3].

Výchozí složení surovin	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
H010 surovina Mokrá	13,88	3,07	1,92	43,9	1,03	0,34	0,67	0,1
Redukční surovina břidlice	34,58	6,97	3,05	26,49	0,82	0,08	1,11	0,21

Tabulka 3: Chemické složení surovin z Lomu Mokrá

Před samotným výpalem by bylo vhodné specifikovat surovinu z hlediska mineralogického složení. Účelem takového pozorování by bylo určení přítomných minerálů a přeměn, zjištění vlastností, geneze a klasifikace zkoumaných hornin. Vzhledem k tomu, že v naší fakultní laboratoři nejsou v současné době podmínky pro tento výzkum, tyto informace nejsou v diplomové práci uvedeny.

Pro získání požadovaných vlastností výsledného vypáleného produktu bylo třeba správně navrhnout nejvhodnější poměru suroviny a redukce, na základě předběžného stanovení optimálních modulů podle [Vzorec 1-3].

Zvolilo se několik stupňů sycení vápnem (od 60 % až po 85 %) pro získání širšího spektra výsledků. Takto byly připraveny vzorky SSV 60 až SSV 85. Dalším krokem bylo dopočítání poměru mezi surovinovou moučkou a redukční surovinou. Pro další určení se ze základních oxidů stanovil hydraulický modul M_H , silikátový modul M_S a aluminátový modul M_A [Tabulka 4].

Stupeň sycené vápnem	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MH	MS	MA
SSV 60	23,68	4,92	2,46	35,66	1,1	3,2	2,0
SSV 65	21,41	4,49	2,33	37,57	1,3	3,1	1,9
SSV 70	19,64	4,15	2,23	39,06	1,5	3,1	1,9
SSV 75	18,22	3,89	2,16	40,25	1,7	3,0	1,8
SSV 80	17,06	3,67	2,09	41,23	1,8	3,0	1,8
SSV 85	16,09	3,49	2,04	42,04	1,9	2,9	1,7

Tabulka 4: Vypočítané složení a cementářské moduly

Kontrola chemického složení připravených vzorků byla provedena spektrometrem. Výsledky měření byly použity pro přepočet modulů [Tabulka 5].

Spektrometr namíchané	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MH	MS	MA
SSV 60	26,00	10,48	2,70	33,93	0,9	2,0	3,9
SSV 65	22,05	7,28	2,43	35,50	1,1	2,3	3,0
SSV 70	20,93	8,36	2,34	36,90	1,2	2,0	3,6
SSV 75	18,71	6,92	2,09	38,18	1,4	2,1	3,3
SSV 80	17,20	6,71	2,12	39,45	1,5	1,9	3,2
SSV 85	17,27	6,80	1,98	39,78	1,5	2,0	3,4

Tabulka 5: Ověření vypočítaných hodnot spektrometrem

Při porovnání vypočítaných a naměřených hodnot je patrné, že jsou zde odchylky ve výsledcích v řádu jednotek. Největší rozdíly jsou v hlinitanech, to může být způsobeno špatnou kalibrací přístroje, nebo také velkou variabilitou složení redukční suroviny. Chyba ve výpočtu by se projevila ve všech základních oxidech podobně.

U takto stanoveného složení je důležité uvést, že se jedná pouze o chemické složení, které mnohdy nepřináší nejlepší výsledky po výpalu suroviny.

Z takto připravených směsí dvou surovin se odebral malý vzorek pro termickou analýzu. Cílem termické analýzy bylo bližší určení chemických vlastností a nalezení vhodné teploty výpalu.

9.2. Termická analýza

Termická analýza je metoda založená na analyzování změn složení a vlastností studovaného materiálu při tepelném zatížení. Jedná se o destruktivní zkoušku, s využitím velice malého množství vzorku (miligramy až gramy). Sleduje se úbytek hmotnosti na citlivých mikrováhách v závislosti na tepelném namáhání. Tuto metodu využívá školní přístroj SDT Q600 - diferenční skenovací kalorimetr [Obrázek 9]. Celkem bylo testováno všech šest vzorků.

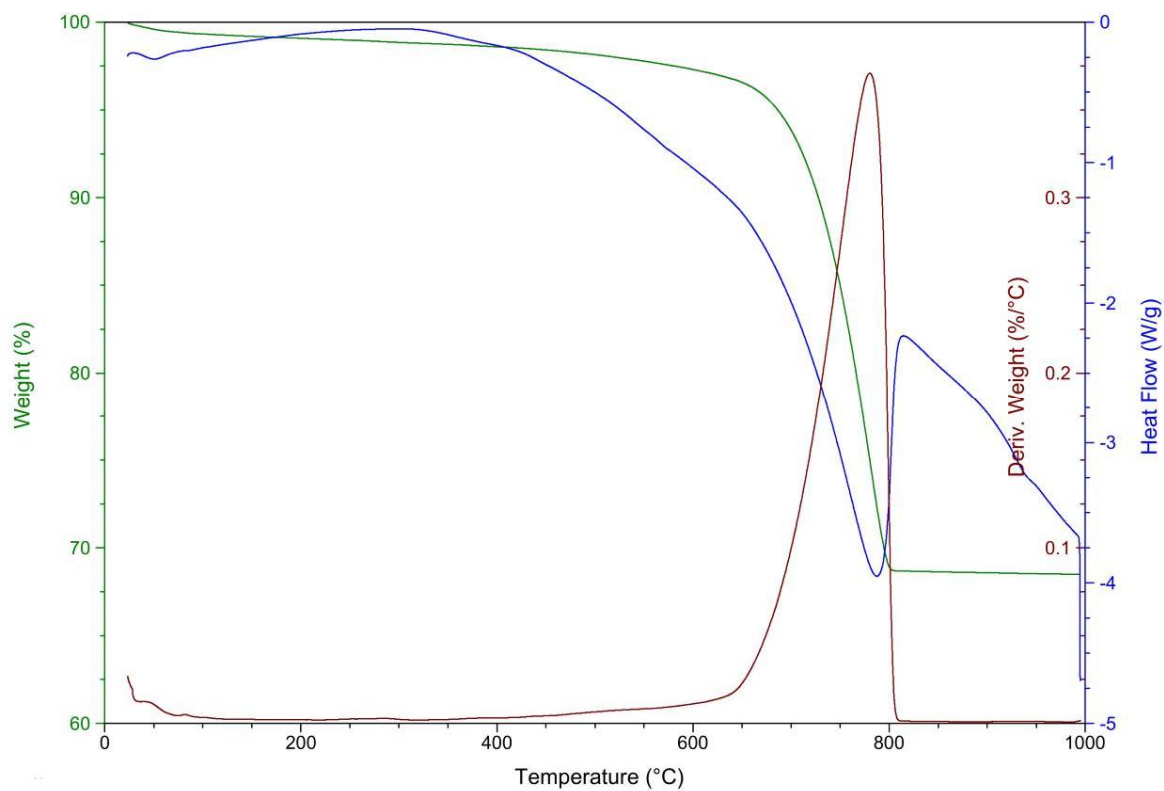


Obrázek 9: Diferenční skenovací kalorimetr SDT G600

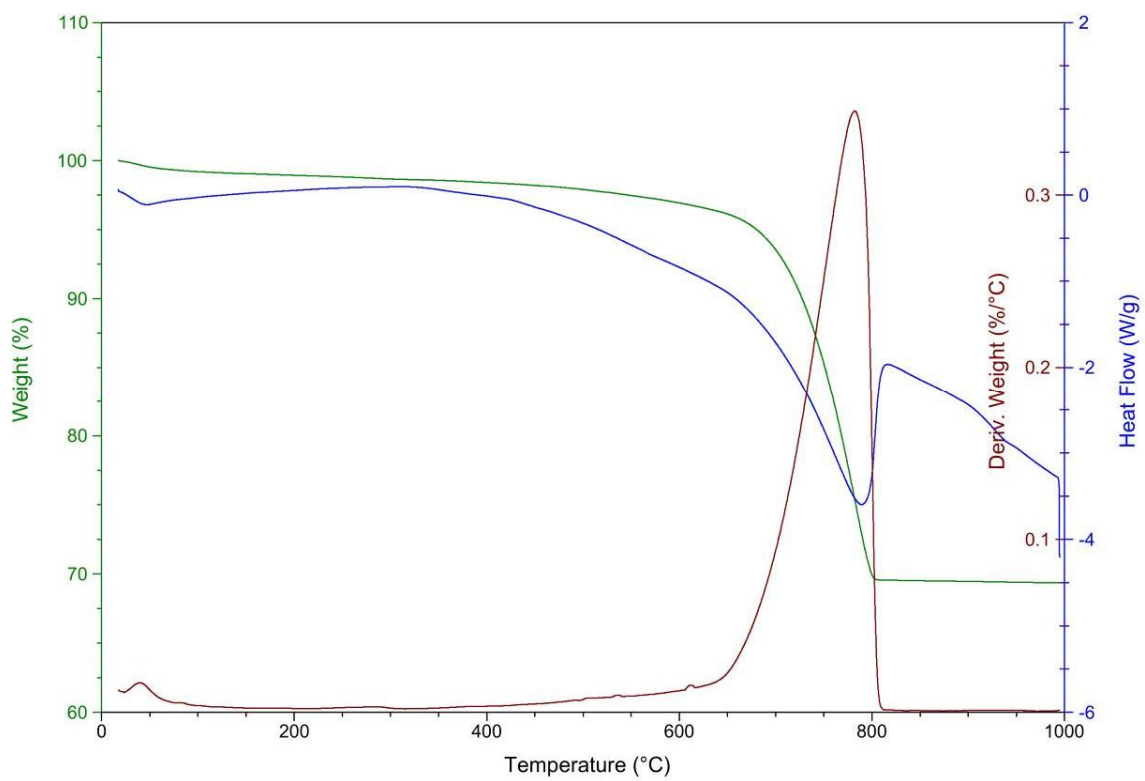
Příprava vzorku spočívá v odebrání malého množství, které se umístí do korundových kelímků. Po zapnutí přístroje se vzorek rovnoměrně zahřívá 10°C za minutu (v našem případě měřeno do 1000°C), při současném měření skutečné teploty a změny hmotnosti vzorku. Přístroj zpracuje naměřená data, ze kterých vytvoří grafický výstup. Z něj se dá určit složení vzorku, obsah vlhkosti, obsah organické a anorganické hmoty.

Získané grafy mají tři křivky:

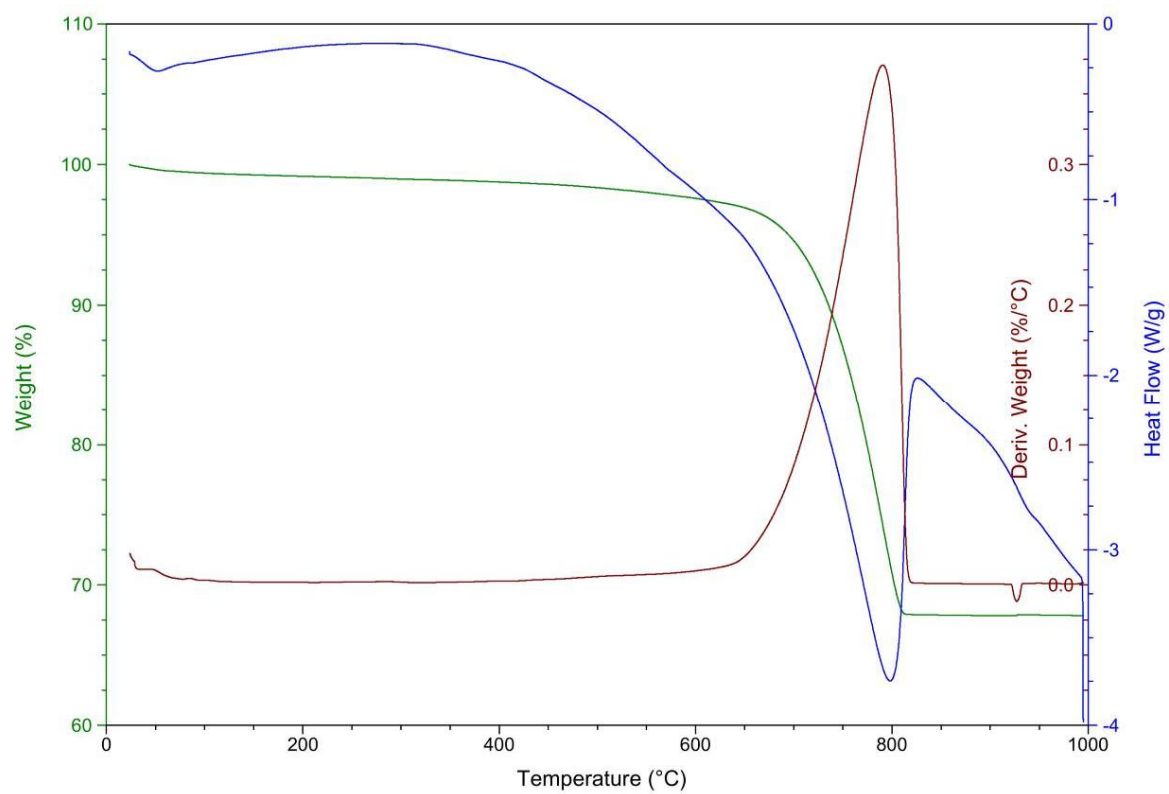
- TG křivka (zelená) určuje hmotnostní změny v závislosti na teplotě
- DTG křivka (červená) je derivací TG křivky, a proto je doplňující pro určení míry rychlosti změny v čase
- DSC křivka (modrá) vyjadřuje tepelný tok



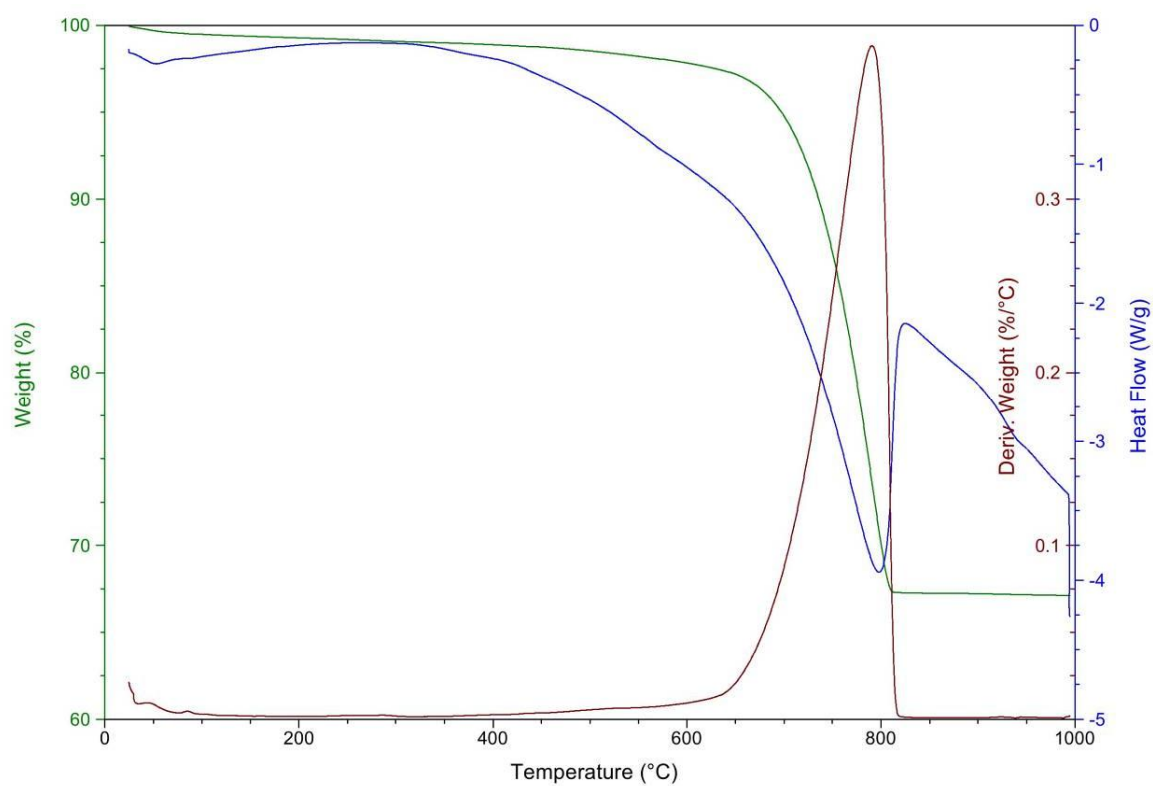
Obrázek 10: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 60



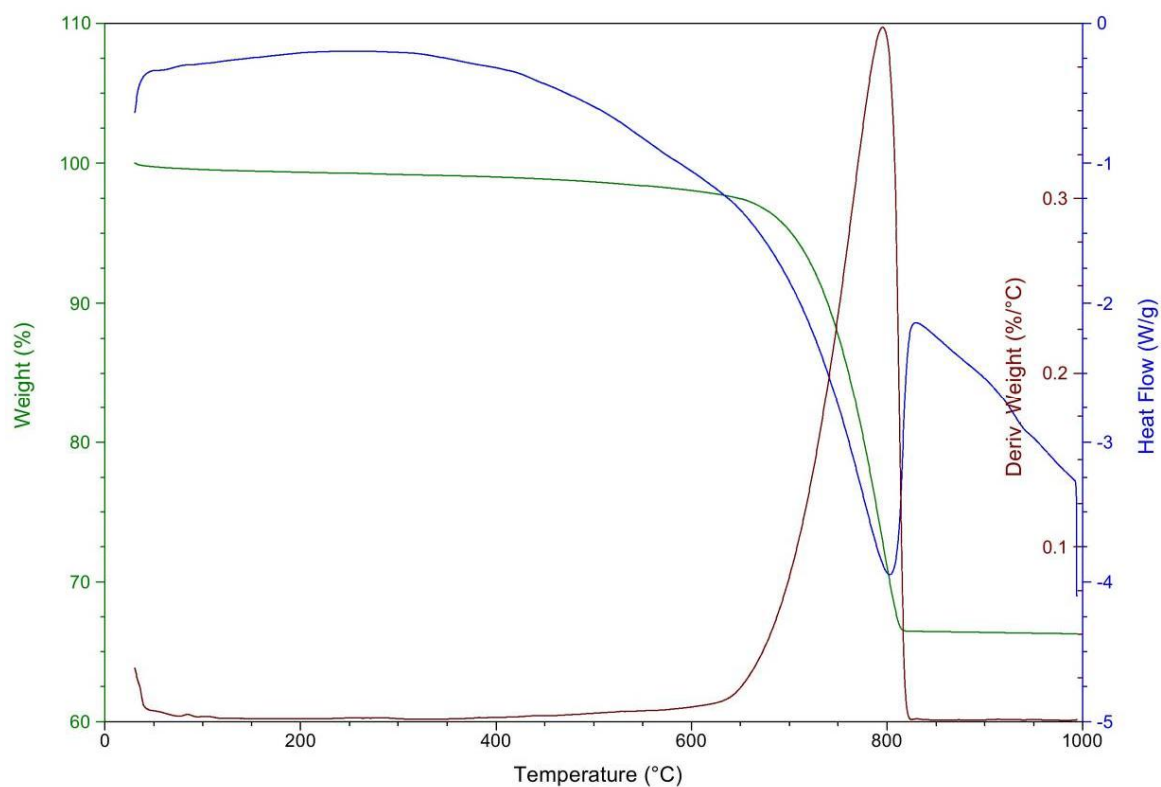
Obrázek 11: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 65



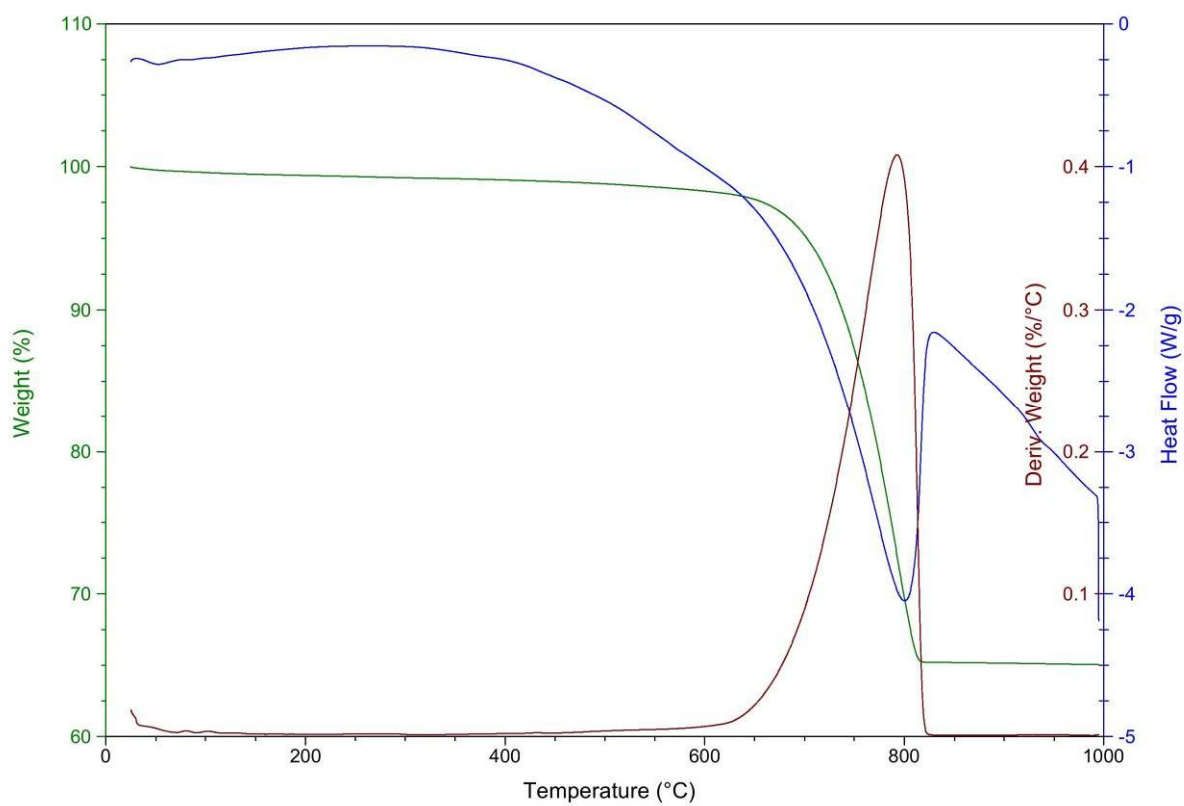
Obrázek 12: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 70



Obrázek 13: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 75

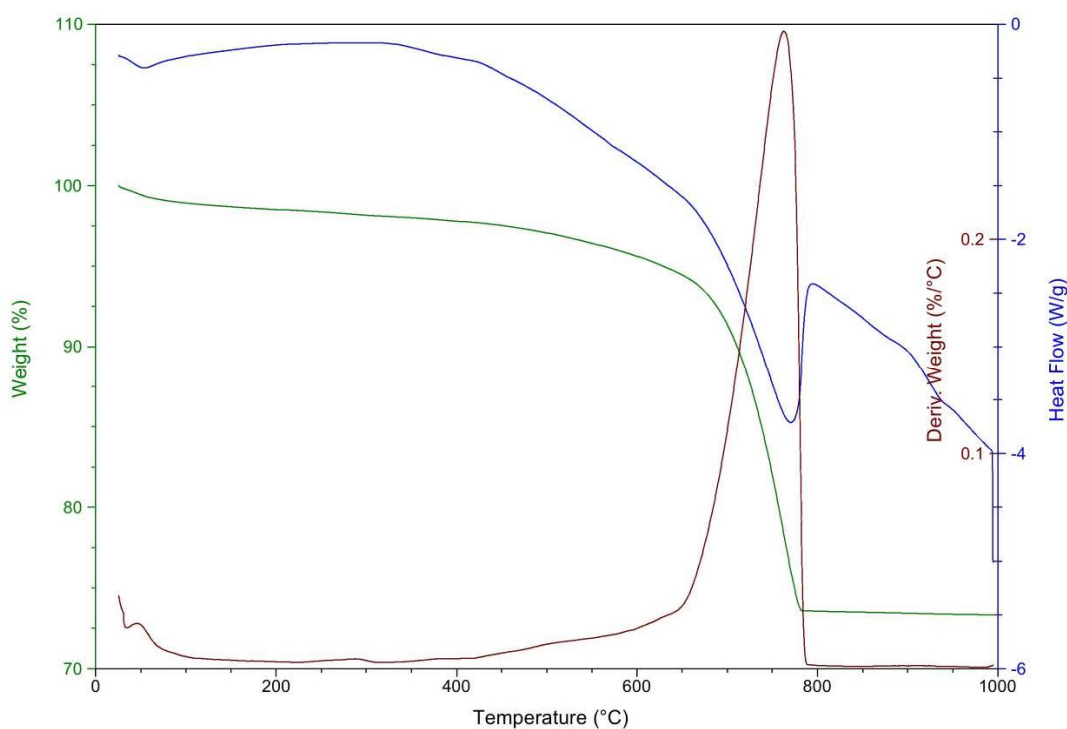


Obrázek 14: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 80



Obrázek 15: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 85

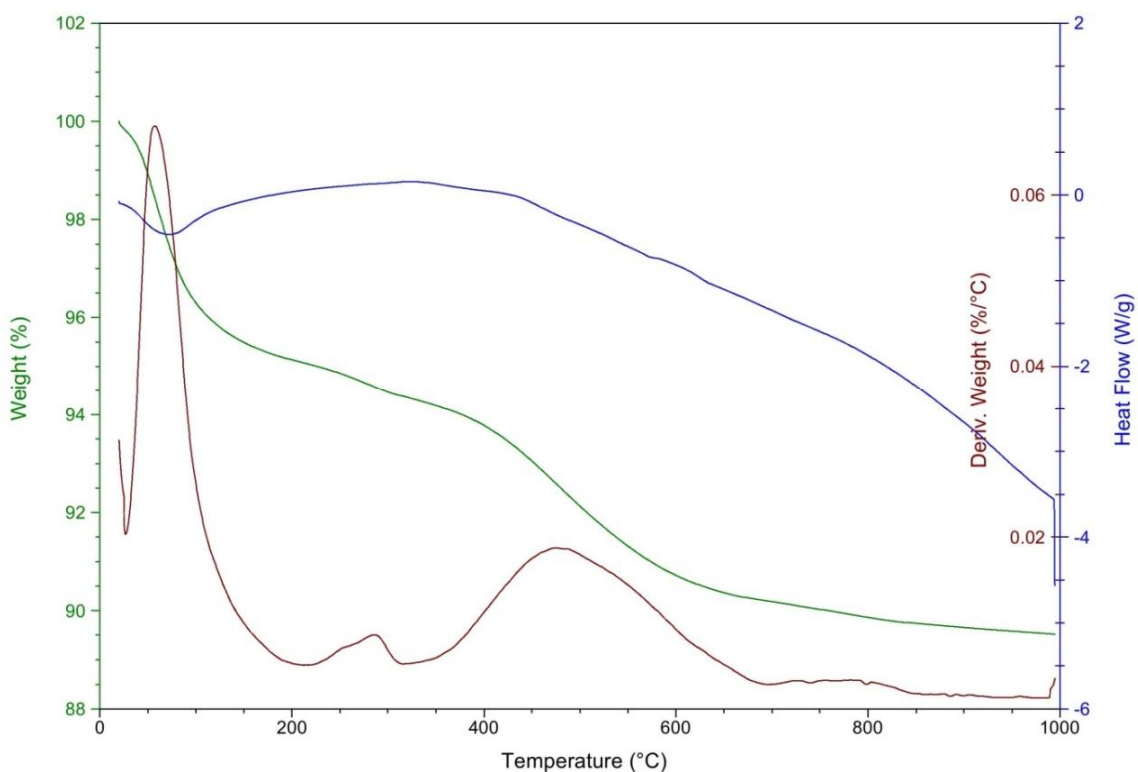
V grafech [Obrázek 10 - 15] jsou nejvíce viditelné úbytky hmotnosti při rozkladu hydroxidu vápenatého ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a uhlíčitanu vápenatého (CaCO_3), při teplotách přibližně od 600 do 825 °C což je nejvýraznější proces přeměny, který lze touto analytickou metodou pozorovat. Z obrázků 10 - 15 je zřejmé, že průběh křivek DTA a TG je hodně podobný a adekvátní poznatky o vhodné teplotě výpalu a složení suroviny určené k výpalu nepřinášejí. V tomto případě je teoreticky na místě další analýza složení namíchané suroviny před a po výpalu. Z důvodu omezených možností realizovat tyto rozsáhlé analytické experimenty bylo přijato zjednodušené řešení. Pro výpal bude použita pouze surovina RB. Výsledná křivka DTA-TG analýzy je na [Obrázek 16].



Obrázek 16: Graf Termická analýza - Redukční surovina Břidlice Mokrá

Nicméně ani z [Obrázek 16] termické analýzy redukční suroviny není příliš patrné, jaká by měla být optimální teplota výpalu. Odstraněním největšího píku by se měl graf zjemnit, proto je třeba ze vzorku testované suroviny odstranit hydroxid a uhlíčitan vápenatý.

Úprava redukční suroviny probíhala pomocí extrakce kyselinou chlorovodíkovou pro upřesnění hydraulických součástí. Deseti procentní kyselina chlorovodíková se postupně přidává do kádinky s redukční surovinou. Zde probíhá bouřlivá reakce, jak uniká oxid uhličitý. Kyselina se přidává do úplného vyšumění. Následně se roztok přefiltruje a zbytek na filtru se dá vysušit. Takto upravený vzorek se znovu podrobil termické analýze [Obrázek 17].



Obrázek 17: Graf Termická analýza - Vzorek upravený kyselinou chlorovodíkovou

Nejvýraznější pík je v oblasti nízkých teplot, to nejspíše znamená, že byl vzorek málo vysušen. Další děje už by měly být od hydraulických součástí a zbytků hydroxidu a oxidu vápenatého. Z tohoto grafu byly stanoveny dvě teploty výpalu jedna 800 °C a druhá 1000 °C.

9.3. Výpal

Výpal skřívkové břidlice probíhal v muflové peci Nabertherm s regulátorem P330. Tento komplet přesné váhy s pecí a softwarem se dá použít pro určení ztráty žíháním v laboratoři. Během výpalu se pomocí softwaru zapisuje jak teplota, tak i průběh hmotnosti. Maximální teplota, kterou pec dokáže vyvinout je 1200 °C. Produkci tepla zajišťují keramické topné desky s integrovaným topným drátem, chráněným před vystřikováním a spaliny. Sklápěcí dvířka pece se mohou po otevření použít jako odkládací plocha. Plášť je vyroben z plechů z ušlechtilé nerezové oceli. Ve dvířkách se nachází otvor pro regulaci přívodu vzduchu, ten byl při výpalu maximálně otevřen. Odtah spalin a odpadního vzduchu se nachází v zadní stěně pece. Programovatelný regulátor P330 umožňuje nastavení teplotní křivky (např.: krok 1 °C a 1minuta). Dále umožňuje zpožděné spuštění, nastavení teplotní výdrže a automatické vypínání po dokončení teplotního cyklu.

Spodní teplotní hranice výpalu byla stanovena na 800 °C, proto se první výpal prováděl na tuto teplotu. Nastavení kroku teplotní křivky bylo 10 °C za minutu s výdrží 30 minut na maximální teplotě. Při druhém zkušebním výpalu se teplota zvedla na hodnotu 1000 °C. Parametry pece zůstaly stejné tj. teplotní zatížení 10 °C za minutu s výdrží 30 minut na maximální teplotě. Velikost navážky a ztráta hmotnosti po výpalu je uvedena v [Tabulka 6].

Teplota [°C]	Hmotnost před výpalem [g]	Hmotnost po výpalu [g]	Ztráta [g]	Ztráta [%]
800	380	340	40	11
1000	500	380	120	24

Tabulka 6: Velikost navážky skřívkové břidlice a úbytek hmotnosti při výpalu

Tento druh pece nemá možnost regulace chlazení vypáleného materiálu. Po vykonání nastaveného cyklu se pec vypne a dále se už nedá zjistit, jak rychle probíhá ochlazení na okolní teplotu. Což může být důležité pro výsledné pojivo.

10. Příprava a zkoušení čerstvé malty

Všechny testované vzorky si připravíme [Tabulka 7], k nim vodu, normované kamenivo a u malty VICAT dále zpomalovací přísadu dle technického listu. U nového pojiva neznáme jeho vydatnost a ani vhodný vodní součinitel, proto se musí udělat vstupní zkušební záměs. Po zjištění poměru vody se provede zkouška konzistence, obsahu vzduchu a objemová hmotnost čerstvé malty pro všechny zkoumané materiály.

Název pojiva	Zkratka pojiva
Skrývková surovina břidlice pálená na 800 °C	BŘIDLA 8
Skrývková surovina břidlice pálená na 1000 °C	BŘIDLA 10
Přirozeně hydraulické vápno Otterbein NHL 5 HYDRADUR	NHL 5
Románský cement značky PROMPT NATURAL CEMENT od firmy Vicat	VICAT

Tabulka 7: Přehled zkoušených pojiv

Vodní součinitel je poměr vody a pojiva. Pro pytlované komerční produkty je znám z technických listů. Ze zkušebních záměsů se dopočítal i pro nově vytvořená pojiva pro udržení jednotnosti konzistence malt [Tabulka 8]. Připravené suché směsi nasypeme do připraveného množství vody a mícháme přibližně 120 s jak je popsáno v ČSN EN 1015-2 [14].

Název	Konzistence [mm]	Vodní součinitel
BŘIDLA 8	170/160	0,65
BŘIDLA 10	180/175	0,7
NHL 5	165/160	0,6
VICAT	165/171	0,5

Tabulka 8: Souhrn vodních součinitelů

10.1. Stanovení konzistence pomocí střešacího stolku

Dále na čerstvé maltě změříme konzistenci pomocí střešacího stolku (ČSN EN 1015-3) [15]. Průběh zkoušek byl stále stejný. Kovový kužel i stolek před zkouškou navlhčíme, postavíme kužel doprostřed stolku, plníme ve dvou vrstvách a každou zhutníme deseti lehkými rázy dřevěného dusadla. Přebytková malta se odstraní a očistí se případné zbytky na stolku. Kužel se v jednom tahu opatrně zvedne a malta se začíná rozlévat, střešací stolek patnácti zdvihy a nárazy vytvoří konečný koláč, který se změří metrem ve dvou na sebe kolmých směrech. Tato zkouška se dělá dvakrát a výsledné hodnoty jsou rovny průměru z těchto dvou měření. Snahou bylo namíchat všechny zkoušené malty podobné konzistence [Tabulka 9].

10.2. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě

Obsahu vzduchu se měří v normované válcové nádobě s víkem opatřeným ventily a tlakoměrem (ČSN EN 1015-7) [16]. Plnění nádoby se provádí ve čtyřech vrstvách, přičemž se každá vrstva zhutní deseti rázy dřevěného dusadla. Horní hrana nádoby se zarovná a otře dočista. Nasadí se víko a zbylý prostor pod víkem se naplní vodou. Po uzavření ventilů se nádoba natlakuje a vynuluje. Při otevření vyrovnávacího ventilu získáme hodnotu na tlakoměru, kterou zaokrouhlíme 0,1 %. Znovu se provádí dvě měření a výsledné hodnoty zprůměrujeme [Tabulka 9].

10.3. Stanovení objemové hmotnosti na čerstvé maltě

Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty se provádí pomocí měřicí nádoby o známé hmotnosti a objemu (m_1, V_v). Ta se naplní až po okraj a celá nádoba se zváží. Dostáváme hodnotu m_2 . Všechny záměsi se zkouší dvakrát a výsledná objemová hmotnost se vypočítá jako průměr z těchto hodnot [Vzorec 9] a zaokrouhlí se na 10 kg/m^3 [Tabulka 9].

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} [\text{kg/m}^3] \quad /9/$$

Naměřené výsledky zkoušek na čerstvé maltě, ze všech míchání, jsou shrnuty v tabulce [Tabulka 9].

Název	Konzistence [mm]	Obsah vzduchu [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
BŘIDLA 8	170/160	4,3	2090
BŘIDLA 10	180/175	3,8	1980
NHL 5	165/160	4,1	2150
VICAT	165/171	6,7	2100

Tabulka 9: Zkoušky na čerstvé maltě

Při porovnání naměřených hodnot lze vidět, že s obsahem vzduchu se nová pojiva přibližují více hydraulickému vápnu. U objemové hmotnosti čerstvých malt jsou hodnoty zase bližší k románskému cementu.

Výroba zkušebních těles probíhá ihned po ukončení předcházejících zkoušek. Čerstvé malty se ukládají do normovaných forem, předem ošetřených minerálním olejem. Zhutňují se ve dvou vrstvách. Takto naplněné formy se překryjí skleněnou tabulkou a uloží se do standardního prostředí se stálou teplotou a vlhkostí.

10.4. Stanovení počátku doby tuhnutí

Další zjišťovanou charakteristikou zkoušenou na čerstvé maltě je počátek doby tuhnutí. Určením této hodnoty můžeme upřesnit čas možné zpracovatelnosti.

Podstatou zkoušky je měření času a pozorování vnikání jehly do maltové kaše. Dokud není dosaženo vzdálenosti 6 ± 3 mm mezi podložní destičkou a jehlou [18]. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v [Tabulka 10].

Počátek doby tuhnutí				
Vzorek	BŘIDLA 8	BŘIDLA 10	NHL 5	VICAT
Čas [min]	-	-	170	28

Tabulka 10: Stanovení počátku doby tuhnutí

Maximální měřená doba tuhnutí byla stanovena na tři hodiny z důvodu omezeného času práce v laboratoři. Malta VICAT tuhne velice rychle, proto se k ní dodává zpomalovací přísady ve formě jemnozrnného prášku. Ten byl volen podle technického listu, ve kterém uvádí hodnotu počátku doby tuhnutí 30 minut. Připravená záměs tedy vyšla podle očekávání. NHL 5 tuhne mnohem pomaleji. V normě ČSN EN 459-1 se uvádí široké rozmezí požadovaných hodnot pro hydraulická vápna. Počátek doby tuhnutí je zde stanoven na více než jednu hodinu, přičemž konec doby tuhnutí by měl nastat do patnácti hodin včetně. U vzorků BŘIDLA 8 a BŘIDLA 10 nebyl za určený časový limit nalezen počátek doby tuhnutí.

Pomocí Vicatova přístroje se nepodařilo určit bližší dobu zpracovatelnosti, z toho důvodu byla využita Metoda B – Doba zpracovatelnosti malt pro tenké spáry dle ČSN EN 1015-9 [19].

10.5. Doba zpracovatelnosti malt – Metoda B

Doba zpracovatelnosti se určuje pomocí střešacího stolku, je to čas, za který se rozliti namíchané záměsi zmenší o určitou hodnotu. Naměřené hodnoty jsou shrnuty v [Tabulka 11].

Doba zpracovatelnosti				
Vzorek	BŘIDLA 8	BŘIDLA 10	NHL 5	VICAT
Čas [min]	153	144	93	16

Tabulka 11: Doba zpracovatelnosti pomocí Metody B

Doba zpracovatelnosti zkoušených malt vyšla nejkratší u malty VICAT, což potvrzuje výsledek předchozí metody. U NHL 5 je výsledek zkoušek vždy mnohem delší než u malty VICAT. Díky této zkoušce byla nalezena doba zpracovatelnosti i pro ostatní malty.

11. Zkoušky na ztvrdlé maltě

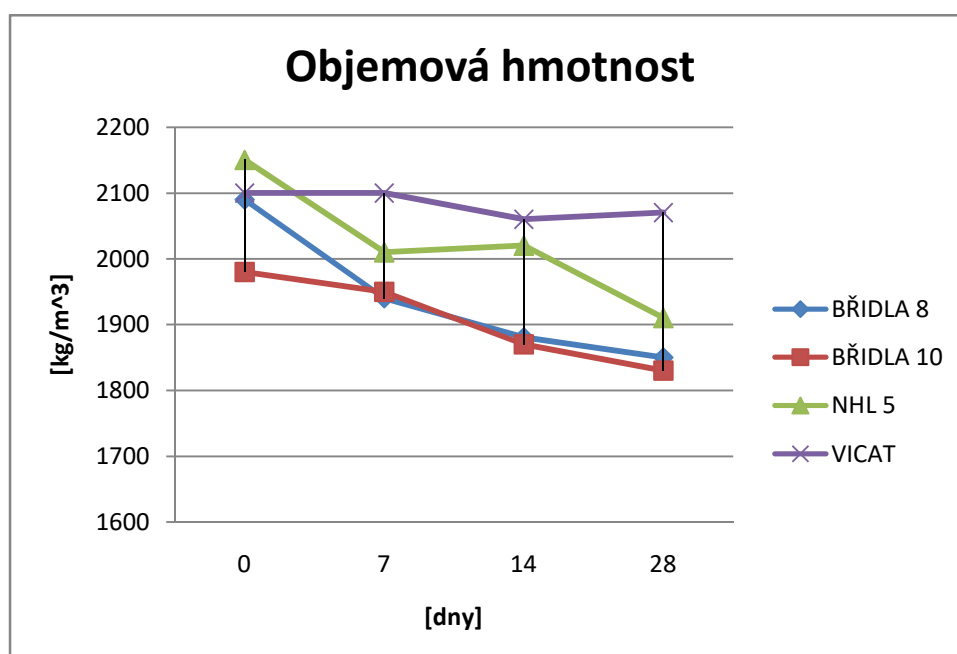
Prostředí a délka uložení zkušebních těles bylo voleno podle normy ČSN EN 1015-11 jako malty s jinými hydraulickými pojivy [17]. Po uplynutí doby uložení se trámečky vyjmou z předepsaného prostředí a okamžitě se podrobují zkušebním metodám.

11.1. Objemová hmotnost suché ztvrdlé malty

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno na trámečcích před zkouškou pevnosti v tahu a tlaku. A to tak, že se tělesa po jednom změřila posuvným metrem a zvažila na laboratorních vahách. Z naměřených dat byla dopočítána objemová hmotnost pro každou záměš. Výsledná hodnota objemové hmotnosti se zaokrouhlí na 10 kg/m^3 [Tabulka 12] [20]. Hodnoty zkoušky jsou porovnány v čase, s přidáním hodnot z míchání jako hodnota 0 dní [Obrázek 18].

Objemová hmotnost ztvrdlé malty [kg/m^3]			
Vzorek	7 dní	14 dní	28 dní
BŘIDLA 8	1940	1880	1850
BŘIDLA 10	1950	1870	1830
NHL 5	2010	2020	1910
VICAT	2100	2060	2070

Tabulka 12: Hodnoty objemové hmotnosti zatvrdlé malty v čase



Obrázek 18: Graf porovnání objemové hmotnosti v čase

Ze získaných dat je patrné, že malta VICAT si udržuje objemovou hmotnost skoro stejnou v porovnání se zbylými vzorky. NHL 5 a nová pojiva BŘIDLA 8 a BŘIDLA 10 v průběhu času výrazněji snižují svou objemovou hmotnost. To je nejspíše způsobeno vypařováním vody ze vzorků, z čehož lze usuzovat, že tato voda není chemicky vázaná a tím pádem ani nepřispěje ke konečným pevnostem.

11.2. Stanovení nasákavost

Nasákavost je jednou ze základních vlastností materiálu, vyjadřuje schopnost přijímání vody do objemu zkoumaného tělesa. Pro stanovení nasákavosti zkušebních vzorků byla použita kapilární metoda [21].

Do připravené mělké nádrže s vodou se vkládají zvážená tělesa po uplynutí doby uložení. Aby byl lepší kontakt vody s povrchem, pod tělesa se dají distanční podložky. Výška hladiny se zachovává po celou dobu zkoušky 5 až 10 mm od spodního okraje zkušebních vzorků (podle potřeby se dolévá).

Při ponoření všech těles se spouští stopky. Dle normy [21] se tělesa váží po 30 a 240 minutách. V našem případě došlo k úpravě a přidání více časů měření, pro získání detailnějšího výsledného grafu [Obrázek 19]. Měření proběhlo v časech 5, 10, 20, 30, 60 a 240 minut.

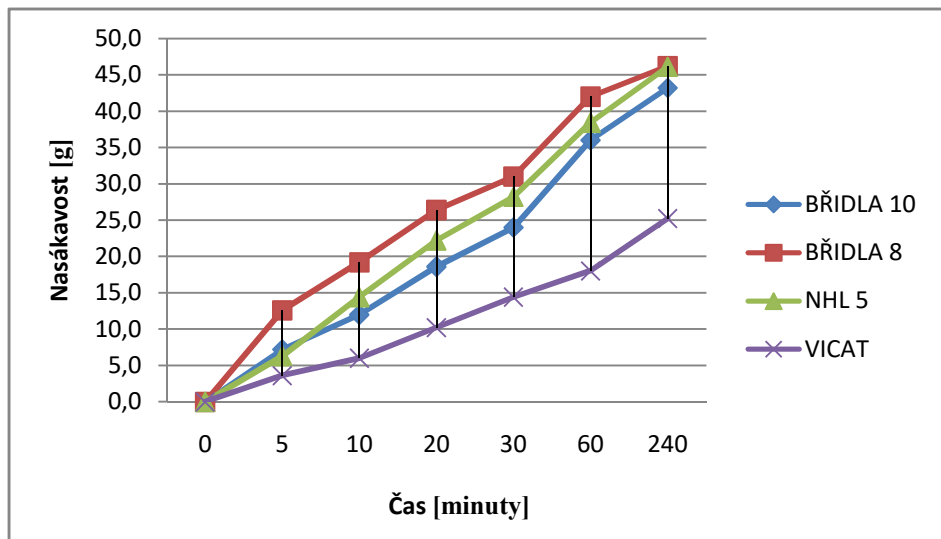
Výslednou kapilární nasákavost zkušebních vzorků v gramech dostaneme prostým odečtením hodnot hmotností po (m_t) a před zkouškou (m_d), jak ukazuje následující vztah [Vzorec 10]:

$$W_{mt} = m_t - m_d \quad /10/$$

Výsledky jsou shrnuty v [Tabulka 13] a dále pro lepší znázornění je vytvořen [Obrázek 19].

Vzorek	W _{m5} [g]	W _{m10} [g]	W _{m20} [g]	W _{m30} [g]	W _{m60} [g]	W _{m240} [g]
BŘIDLA 8	12,6	19,2	26,4	31,0	42,0	46,2
BŘIDLA 10	7,2	12,0	18,6	24,0	36,0	43,2
NHL 5	6,3	14,4	22,2	28,2	38,4	46,1
VICAT	3,6	6,0	10,2	14,4	18,0	25,2

Tabulka 13: Výsledné hodnoty kapilární nasákavosti



Obrázek 19: Graf vývoje kapilární nasákavosti v čase

V grafu lze pozorovat, že malta VICAT je nejméně nasákavá, ať už rychlostí nasáknutí, tak i výslednou kapilární absorpcí. Zbylé zkoušené malty jsou si průběhem i výslednou nasákavostí velice podobné. Což nám potvrzuje výsledky z předchozí kapitoly o objemové hmotnosti, kde malty BŘIDLA 8, BŘIDLA 10 a NHL 5 vykazují značné hmotnostní úbytky v čase a tím vznikají otevřené póry a kapiláry, které přispívají k zvýšené nasákavosti.

11.3. Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu se zpravidla nezkouší na maltách z hydraulického vápna. Výrobci ve většině případů poskytují v technických listech hodnoty jen pevnosti v tlaku po 28 dnech, jak jim ukládá norma ČSN EN 459-1. Ale i přesto byli všechny zkoušené záměsi podrobeny této zkoušce [17]. Pevnost v tahu se provádí v laboratorním lisu, kde se určuje na základě tříbodového namáhání zkušebních vzorků do porušení.

Lis zatěžuje trámečky konstantní rychlostí a přitom zaznamenává maximální sílu $F [N]$. Z takto na měřených sil dopočítáme pevnost v tahu za ohybu podle vzorce [Vzorec 11]. Výsledné hodnoty jsou průměrem ze tří zkoušek pro každou záměs [Tabulka 14].

$$f = 1,5 \frac{F * l}{b * d^2} [MPa]$$

/11/

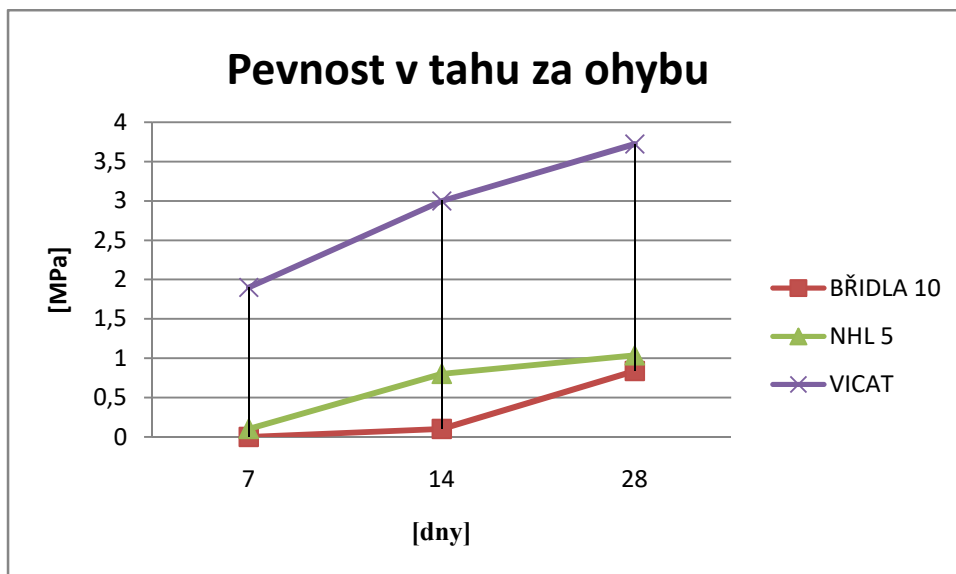
Kde:

- l vzdálenost mezi podporami $[mm]$
- b šířka zkušebního tělesa $[mm]$
- d výška zkušebního tělesa $[mm]$

Pevnost v tahu za ohybu [MPa]			
Vzorek	7 dní	14 dní	28 dní
BŘIDLA 8	0,0	0,0	0
BŘIDLA 10	0,0	0,1	0,8
NHL 5	0,1	0,8	1,0
VICAT	1,9	3,0	3,7

Tabulka 14: Vývoj pevnosti v tahu za ohybu po 28 dní

Pro vzorek REDUKCE 800 vychází nulové hodnoty, to znamená, že má tak nízkou pevnost, kterou lis nedokáže změřit. Názornější vyjádření výsledků popisuje následující graf [Obrázek 20]. V něm je na první pohled patrné, že malta VICAT má mnohem vyšší pevnosti než ostatní zkoušené vzorky. Nové pojivo BŘIDLA 10 má velice pozvolný náběh počátečních pevností, nicméně po 28 dnech se velice blíží hydraulickému vápnu NHL 5.



Obrázek 20: Graf vývoje pevnosti v tahu za ohybu v čase

11.4. Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku se provádí na vzniklých polovinách vzorků po zkoušce v tahu. Každý půl trámeček se umístí do lisu tak, že kolmo na směr plnění a na horní i spodní stranu se přikládají čtvercové stykové destičky o délce strany 40 mm. Vyvozovaná rychlost lisu je konstantní a zatěžuje se do porušení vzorku.

Z lisu se odečte maximální síla F [N], která se zaznamená a výpočtem se dopočítá podle vzorce [Vzorec 12] pevnost v tlaku. Konečná hodnota pevnosti v tlaku se určí jako průměrná hodnota z šesti měření [Tabulka 15].

$$f = \frac{F}{A} [\text{MPa}]$$

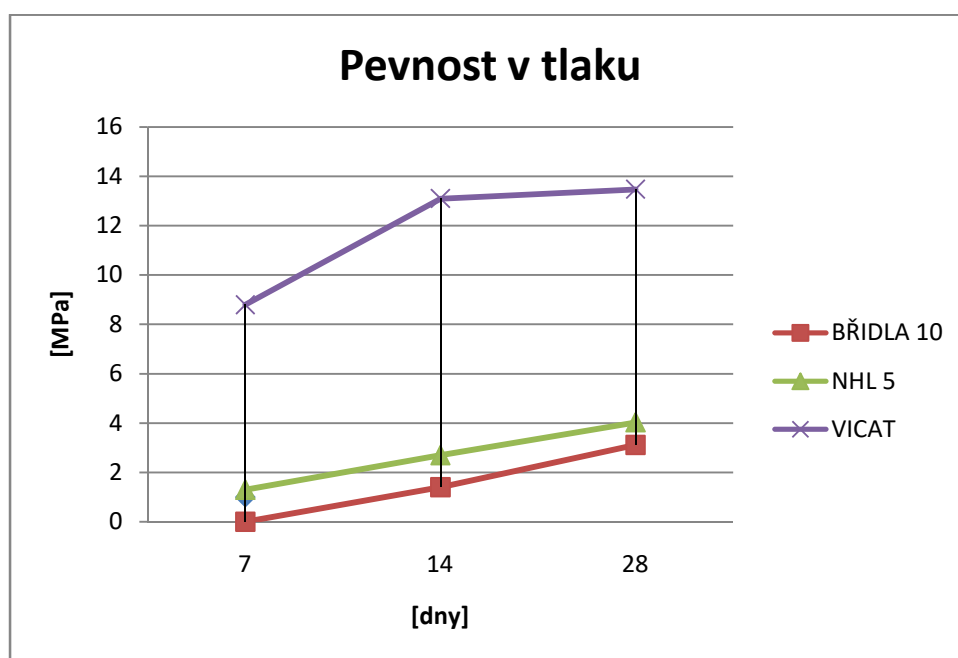
/12/

- A je plocha zatěžování [mm^2]

Pevnost v tlaku [MPa]			
Vzorek	7 dní	14 dní	28 dní
BŘIDLA 8	0,0	0,0	0
BŘIDLA 10	0,0	1,4	3,1
NHL 5	1,3	2,7	4,0
VICAT	8,8	13,1	13,5

Tabulka 15: Pevnosti zatvrdlé malty v tlaku

U vzorku BŘIDLA 8 hodnota pevnosti v tlaku byla mimo měřitelný rozsah lisu, proto výsledné hodnoty jsou na nule. Velké rozdíly v pevnosti v tlaku jsou lépe patrné na následujícím [Obrázek 21]. Pevnosti malty VICAT jsou dle očekávání mnohem vyšší než je tomu u hydraulického vápna NHL 5. Vývoj pevností nového pojiva BŘIDLA 10 je lineární a velice se přibližuje hydraulickému vápnu.



Obrázek 21: Graf pevnosti v tlaku zatvrdlých malt v čase

U všech zkoušených malt je předpokládáno pozvolné navyšování pevnosti v čase, proto by bylo zajímavé provedení delšího pozorování. Například v technickém listě malty VICAT [Příloha č. 2] se uvádějí hodnoty i po šesti měsících. Z tohoto důvodu výsledky po 28 dnech nejsou příliš vypovídající, nicméně pro porovnání zkoumaných malt se jedná o vhodné časové měřítko, které vychází ze současných platných norem.

Závěr

Nosným tématem diplomové práce byla problematika uplatnění nízkoenergetických hydraulických pojiv ve stavebnictví. Pojivové systémy, které jsou vypalovány pod mez slinutí, mají nižší dopad na životní prostředí. Sortiment výrobků, dostupný v ČR je v současné době omezený, i když se jedná o stavební materiály unikátních vlastností. Dílčím cílem byl návrh složení, výroba, ověření a porovnání vlastností nově vytvořeného hydraulického pojiva.

V teoretické části jsem se zabýval charakterizací hydraulických pojiv a jejich současným i historickým vývojem a vlastnostmi. Zaměřil jsem se na tři nejdostupnější zástupce nízkoteplotních hydraulických pojiv na tuzemském trhu, a to hydraulické vápno Otterbein NHL 5 HYDRADUR, belitický cement Belit Feinschlamme a románský cement PROMPT NATURAL CEMENT od firmy Vicat. Z nich se jako nejvhodnější pro praktické zkoušky jevil románský cement a hydraulické vápno, se kterými jsem dále pracoval.

Při návrhu a experimentální výrobě nového pojiva jsem postupoval podle možností, které poskytuje laboratorní vybavení fakulty. Téma výroby a ověřování nových výrobků je zajímavé a přínosné, avšak vždy se jedná o dlouhodobý výzkum. Výsledky prezentované v této práci lze pokládat za primární experimenty, které je možno dále doplňovat a usměrňovat.

Výsledky měření, které poskytly vybrané experimentální metody, jednoznačně neodpověděly na některé důležité otázky, jako například jaká je optimální teplota výpalu, režim výpalu, atd. Také vztah mezi minerálním složením vstupních surovin, přeměnami po výpalu a hydrataci se nepodařil identifikovat a to zejména z důvodu omezeného času na zpracování diplomové práce.

Návrhem a ověřením vlastností připravené malty s novým typem nízkoteplotního hydraulického pojiva vznikl smysluplný pokus, který může mít praktické využití pro inovaci sortimentu v cementářském průmyslu. Získalo se hydraulické pojivo blízké přírodním hydraulickým vápnům, které spotřebovává při výrobě surovinu v současné době označenou za odpad. Další výzkum v této problematice by mohl přinést přesnější určení vhodnosti tepelného zpracování, což by znamenalo další snížení spotřeby energie. Jednalo by se tak o ekologicky šetrné pojivo použitelné pro obnovu historických staveb, ale využití by mohlo nalézt i v dnešním stavitelství pro své dobré vlastnosti.

Poděkování:

Poděkování patří především mé vedoucí Ing. Janě Daňkové, Ph.D. za věcné připomínky. Dále Ing. Pavlovi Mecovi za ochotu a dobrou radu při provádění chemické a termické analýzy a celému kolektivu laboratoří. Diplomová práce prezentuje znalosti nabyté v rámci projektu Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin - Projekt udržitelnosti. Identifikační kód: LO1406. Projekt je podporován Národním programem udržitelnosti financovaném ze státního rozpočtu ČR.

Seznamy

Literatura

- [1] Svoboda, Luboš. Stavební hmoty. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-8076-007-1.
- [2] Hlaváč, Jan. Základy technologie silikátů. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [3] kolektiv, Petr Kotlík a. Stavební materiály historických objektů. Praha: VŠCHT, 1999. ISBN 80-8070-347-9.
- [4] Kolektiv autorů: Románský cement - historie, vlastnosti a možnosti použití. Praha: Zpravodaj STOP, 2011. Sv. 13, str. 60. ISSN 1212-4168.
- [5] Seidlerová, Irena a Jiří Dohnálek. Dějiny betonového stavitelství. Praha: Informační centrum ČKAIT, 1999. ISBN 80-86364-01-1.
- [6] Harmáček, Josef. Stavební pojiva. místo neznámé: SNTL, 1961.
- [7] Jaroslav Láník, Miloš Cikrt. Dvě tisíciletí vápenictví v českých zemích. Česko: Svaz výrobců cementu a vápna Čech, Moravy a Slezska, 2001.
- [8] HOŠEK, Jiří. Historické omítky. Grada Publishing as, 2007.
- [9] SCHULZE, Walter. Necementové malty a betony. Přeložil Vladimír LACH. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00188-9.
- [10] VITRUVIUS POLLIO, Marcus. *Deset knih o architektuře*. Praha: Svoboda, 1979. Antická knihovna (Svoboda).

Technické normy

- [11] ČSN 72 1210 (721210) Vápenec. Všeobecná ustanovení. Dolomit. Praha: Český normalizační institut, 1985.
- [12] ČSN EN 459-1 (722201) Stavební vápno - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [13] ČSN EN 197-1 ED. 2 (722101) Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [14] ČSN EN 1015-2 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [15] ČSN EN 1015-3 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím stráscacího stolku). Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [16] ČSN EN 1015-7 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 7: Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [17] ČSN EN 1015-11 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [18] ČSN EN 459-2 (722201) Stavební vápno - Část 2: Zkušební metody. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [19] ČSN EN 1015-9 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 9: Stanovení doby zpracovatelnosti a času pro úpravu čerstvé malty. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [20] ČSN EN 1015-10 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [21] ČSN EN 12808-5 (722470) Lepidla a spárovací malty pro keramické obkladové prvky - Část 5: Stanovení nasákavosti. Praha: Český normalizační institut, 2009.

Internetové zdroje

- [22] A. Guerrero, S. Goñi, A. Moragues, J. S. Dolado. Microstructure and Mechanical Performance of Belite Cements from High Calcium Coal Fly Ash. onlinelibrary.wiley.com. [Online] [Citace: 8. 7. 2018.] <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00344.x>.
- [23] FAN Lei, WEN Zhaijun, WANG Jing. BeliteRich Portland Cement and Concrete. air-q-gov.baes.by. [Online] [Citace: 7. 8. 2018.] http://air-q-gov.baes.by/userfiles/file/air_q_RU/CD/chapter_6/6-9.pdf.
- [24] Rovnaníková, Pavla. Materiály historických omítek. studioaxis.cz. [Online] [Citace: 7. 8. 2018.] <https://www.studioaxis.cz/images/pamatky/rovnanikovapavla.doc>.
- [25] Hornická skripta. podzemi.solvayovylomy.cz. [Online] [Citace: 7. 8. 2018.] <http://podzemi.solvayovylomy.cz/prirucka/vapcem/vapcem.htm>.
- [26] Edison M. P., 2007. Natural Cement in the 21st Century. Journal of ASTM International, Vol. 4, No. 1. 10 str. [Online] [Citace: 7. 8. 2018.] https://www.researchgate.net/publication/240757116_Natural_Cement_in_the_21st_Century
- [27] ŠACHTOVÁ PEC [Online] [Citace: 7. 8. 2018.] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/LDLimeShaftKilnBasic.jpg>
- [28] ŠTUKOVÁ VÝZDOBA Z ROMÁNSKÉHO CEMENTU [Online] [Citace: 7. 8. 2018.] <http://www.remmers.cz/remmers-fachplanung/romansky-cement.htm>
- [29] TŘI SOUTĚSKY HRÁZ [Online] [Citace: 10. 9. 2018.] [https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99i_sout%C4%9Bsky_\(hr%C3%A1z\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99i_sout%C4%9Bsky_(hr%C3%A1z))
- [30] Geologické lokality. geology.cz [Online] [Citace: 12. 9. 2018.] <http://lokality.geology.cz/3280>
- [31] ČESKOMORAVSKÝ CEMENT HEILDELBURG CEMENT Groupheidelbergcement.cz [Online] [Citace: 7. 8. 2018.] <https://www.heidelbergcement.cz/cs/kontakty/cmc/vyrobnizavody/mokra>

[32] CARMEUSE, carmeuse.eu [Online] [Citace: 7. 8. 2018.]

<http://www.carmeuse.eu/cz/o-carmeuse-czech-republic>

[33] HUGHES, D. C., et al. Roman cements – Belite cements calcined at low temperature.

Cement and Concrete Research, 2009, 39.2: 77-89 [Online] [Citace: 15. 9. 2018.]

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.010>

Seznam použitého značení

%	procento
M _H	hydraulický modul
M _S	silikátový modul
M _A	aluminátový modul
C	oxid vápenatý
S	oxid křemičitý
A	oxid hlinitý
F	oxid železitý
S _s	stupeň sycení vápnem
°C	stupeň Celsia
K	stupeň Kelvina
kg	kilogram
m ³	metr krychlový

NHL	přirozeně hydraulické vápno
HL	hydraulické vápno
Z	přirozeně hydraulická vápna s příměsí dalších látek
ha	hektar
SM	surovina Mokrá
RB	redukční surovina břidlice
TG	křivka hmotnostní změny v závislosti na teplotě
DTG	křivka derivace TG
DSC	křivka tepelného toku
kg/m^3	kilogram na metr krychlový
ρ_m	objemová hmotnost
m	hmotnost
V	objem
mm	milimetr
W_{mt}	kapilární nasákavost
F	síla při porušení
l	vzdálenost
b	šířka
d	výška

N	newton
A	plocha
mm ²	milimetr čtvereční
MPa	megapascal

Obrázky

Pokud není uvedeno jinak autorem obrázku je Vojtěch Odstrčil.

Obrázek 1: Teplotní porovnání výpalu přírodního a Portlandského cementu [26].....	16
Obrázek 2: Výstavba milíře [7]	17
Obrázek 3: Hoffmanova kruhovka [25]	18
Obrázek 4: Řez šachtovou pecí [27].....	20
Obrázek 5: Tři soutěsky – hráz [29]	24
Obrázek 6: Graf ukázka pevnosti v tlaku s porovnáním HBC s Portlandským cementem [23]	25
Obrázek 7: Štuková výzdoba z románského cementu [28]	26
Obrázek 8: Mapa lokality Mokrá ID: 3280 [30]	29
Obrázek 9: Diferenční skenovací kalorimetr SDT G600	35
Obrázek 10: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 60	36
Obrázek 11: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 65	36
Obrázek 12: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 70	37

Obrázek 13: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 75	37
Obrázek 14: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 80	38
Obrázek 15: Graf Termická analýza - Vzorek SSV 85	38
Obrázek 16: Graf Termická analýza - Redukční surovina Břidlice Mokrý	39
Obrázek 17: Graf Termická analýza - Vzorek upravený kyselinou chlorovodíkovou.....	40
Obrázek 18: Graf porovnání objemové hmotnosti v čase	46
Obrázek 19: Graf vývoje kapilární nasákavosti v čase	48
Obrázek 20: Graf vývoje pevnosti v tahu za ohybu v čase	50
Obrázek 21: Graf pevnosti v tlaku zatvrdlých malt v čase.....	51

Tabulky

Tabulka 1: Sortiment hydraulických vápen	22
Tabulka 2: Porovnání hlavních slínekových minerálů.....	24
Tabulka 3: Chemické složení surovin z Lomu Mokrý	33
Tabulka 4: Vypočítané složení a cementářské moduly	33
Tabulka 5: Ověření vypočítaných hodnot spektrometrem	34
Tabulka 6: Velikost navážky skrývkové břidlice a úbytek hmotnosti při výpalu.....	41
Tabulka 7: Přehled zkoušených pojiv	42
Tabulka 8: Souhrn vodních součinitelů.....	42
Tabulka 9: Zkoušky na čerstvé maltě.....	44
Tabulka 10: Stanovení počátku doby tuhnutí.....	44

Tabulka 11: Doba zpracovatelnosti pomocí Metody B.....	45
Tabulka 12: Hodnoty objemové hmotnosti zatvrdlé malty v čase	46
Tabulka 13: Výsledné hodnoty kapilární nasákavosti.....	48
Tabulka 14: Vývoj pevnosti v tahu za ohybu po 28 dní.....	49
Tabulka 15: Pevnosti zatvrdlé malty v tlaku.....	51

Vzorce

Hydraulický modul	$M_H = \frac{C}{S + A + F} \approx \text{pro cementy } 1,7 - 2,4$	/1/
Silikátový modul	$M_S = \frac{S}{A + F} \approx \text{pro cementy } 1,7 - 2,7$	/2/
Aluminátový modul	$M_A = \frac{A}{F} \approx \text{pro cementy } 1,5 - 2,5$	/3/
Bogue	$C = 2,8 \cdot S + 1,65 \cdot A + 0,35 \cdot F$	/4/
Kühl	$C = 2,8 \cdot S + 1,1 \cdot A + 0,7 \cdot F$	/5/
Lea – Parker	$C = 2,8 \cdot S + 1,18 \cdot A + 0,65 \cdot F$	/6/
Stupeň sycení vápnem	$S_{SK} = \frac{C}{2,8 \cdot S + 1,1 \cdot A + 0,7 \cdot F}$	/7/
Rozklad vápence	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	/8/
Objemová hmotnost		

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} [kg/m^3] \quad /9/$$

Kapilární nasákavost

$$W_{mt} = m_t - m_d \quad /10/$$

Pevnost v tahu za ohybu

$$f = 1,5 \frac{F * l}{b * d^2} [MPa] \quad /11/$$

Pevnost v tlaku

$$f = \frac{F}{A} [MPa] \quad /12/$$

Seznam příloh

1. Technický list Hydraulické vápno značky Otterbein NHL 5 HYDRADUR
2. Technický list Prompt Románský cement od firmy Vicat